

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA ELETTRICA



TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**NORMA IEC 62471: VALUTAZIONE DEL RISCHIO FOTOBIOLOGICO CON
APPLICAZIONE DEL METODO ALTERNATIVO SU ALCUNE LAMPADE DI
MAGGIOR USO**

Relatore: Ch.mo prof. Pietro Fiorentin
dipartimento di Ingegneria Elettrica

Laureando: Davide Buna

ANNO ACCADEMICO 2011-2012

Dedicata a mio nonno e ai miei genitori

INDICE

| | |
|--|----|
| Sommario | 1 |
| Introduzione | 3 |
| Capitolo 1: Richiami di teoria | 5 |
| 1.1 Flusso luminoso | 5 |
| 1.2 Illuminamento (di un punto su una superficie) | 5 |
| 1.3 Irradianza (di un punto su una superficie) | 6 |
| 1.4 Luminanza (per una data direzione, di un punto su una superficie) | 6 |
| 1.5 Radianza (per una data direzione, di un punto su una superficie) | 6 |
| 1.6 Irradianza spettrale..... | 6 |
| 1.7 Radianza spettrale..... | 7 |
| Capitolo 2: Analisi della normativa | 9 |
| 2.1 Angolo sotteso dalla sorgente..... | 9 |
| 2.2 Limiti di esposizione..... | 9 |
| 2.2.1 <i>Limiti di esposizione attinica ai raggi UV per la pelle e gli occhi</i> | 9 |
| 2.2.2 <i>Limite di esposizione per gli occhi ai raggi vicino-UV</i> | 10 |
| 2.2.3 <i>Limite di esposizione per i danni provocati dalla luce blu</i> | 11 |
| 2.2.4 <i>Limite di esposizione per i danni alla retina dovuti alla luce blu in caso di piccole sorgenti</i> | 12 |
| 2.2.5 <i>Limiti di esposizione per i danni alla retina dovuti a irraggiamento</i> | 12 |
| 2.2.6 <i>Limiti di esposizione per i danni alla retina dovuti al rischio termico – debole stimolo visivo</i> | 13 |
| 2.2.7 <i>Limiti di esposizione per i danni all'occhio dovuti alla radiazione infrarossa</i> | 13 |
| 2.2.8 <i>Limiti di esposizione per i danni alla pelle dovuti al rischio termico</i> | 14 |
| 2.3 Classi di rischio degli illuminanti | 14 |
| 2.3.1 <i>Esonerato dal gruppo</i> | 14 |
| 2.3.2 <i>Gruppo di Rischio 1 (basso rischio)</i> | 14 |
| 2.3.3 <i>Gruppo di Rischio 2 (rischio moderato)</i> | 15 |
| 2.3.4 <i>Gruppo di Rischio 3 (alto rischio)</i> | 15 |
| Capitolo 3 :Strumenti di misura | 17 |
| 3.1 Goniofotometro | 17 |
| 3.2 Spettroradiometro | 18 |
| 3.3 Luxmetro..... | 18 |
| 3.4 Radiometro | 18 |
| 3.5 Piranometro | 19 |
| 3.6 Luxmetro di precisione | 20 |
| Capitolo 4 : Tipologie di lampade | 21 |
| 4.1 Lampade fluorescenti..... | 21 |
| 4.2 Lampade ad incandescenza | 22 |
| 4.3 Lampade alogene | 23 |

| | |
|---|----|
| 4.4 Lampade ad alogenuri | 25 |
| 4.5 Lampade a mercurio..... | 26 |
| 4.6 Lampade a LED..... | 27 |
| Capitolo 5: Prove di laboratorio | 29 |
| 5.1 Metodo consigliato dalla norma..... | 29 |
| 5.1.1 <i>Misure di irradianza</i> | 29 |
| 5.1.2 <i>Misure di radianza</i> | 29 |
| 5.2 Modello analizzato semplificato | 30 |
| 5.2.1 <i>Incertezze di misura</i> | 33 |
| Capitolo 6: Analisi dati ottenuti | 35 |
| 6.1 Tubo a LED..... | 35 |
| 6.2 Led privi di ottica..... | 40 |
| 6.3 Altre lampade a LED | 41 |
| 6.3.1 <i>Lampada SWING LED</i> | 41 |
| 6.3.1 <i>Lampada PRISMA LED</i> | 43 |
| 6.3.3 <i>Lampada BLEND T1</i> | 45 |
| 6.3.4 <i>Lampada BLEND T2</i> | 47 |
| 6.4 Altri tipi di illuminanti | 49 |
| 6.4.1 <i>Lampade fluorescenti</i> | 49 |
| 6.4.2 <i>Lampade a mercurio ad alta pressione</i> | 50 |
| 6.4.3 <i>Lampade ad alogeni</i> | 51 |
| 6.4.4 <i>Lampade ad alogenuri</i> | 52 |
| 6.4.5 <i>Lampada ad incandescenza</i> | 53 |
| Capitolo 7: Conclusioni | 55 |
| Allegato A..... | 56 |
| Allegato B..... | 57 |
| Allegato C..... | 58 |
| Allegato D..... | 59 |
| Bibliografia | 63 |

SOMMARIO

Il risparmio energetico è di fondamentale importanza nel panorama attuale dell'illuminazione. La ricerca e lo sviluppo hanno permesso alle nuove tecnologie, quali ad esempio illuminanti a semiconduttore, di potersi inserire nel mercato e in poco tempo di rendersi competitivi con i tradizionali sistemi di illuminazione forti della lunga durata di vita, della poca manutenzione e dell'alta efficienza luminosa.

Tuttavia questa l'affermarsi di queste nuove tecnologie illuminanti deve poter essere regolamentata adeguatamente per non permettere l'immissione nel mercato di materiale potenzialmente dannoso senza che questo sia adeguatamente segnalato. A tal proposito nasce la norma IEC atta a fornire linee guida sulla valutazione di tale danno e sulla classificazione.

Di seguito saranno analizzati, attraverso un metodo semplificato, prevalentemente degli apparecchi con lampade a LED e ne sarà valutata la loro categoria di rischio e vedremo che non vi è motivo di dubitare della loro estraneità al rischio fotobiologico. Vedremo inoltre che il comportamento non dipende solo dalla lampada ma anche dal sistema nel quale è inserita.

INTRODUZIONE

La lampade sono state sviluppate e prodotte in grandi quantità e sono diventate di uso comune in un'epoca in cui gli standard del settore di sicurezza non erano la norma. La valutazione ed il controllo delle radiazioni ottiche pericolose provenienti da lampade o sistemi di illuminazione sono un argomento assai più complicato dello studio di effetti simili ma ad una sola lunghezza d'onda. Le misure radiometriche sono piuttosto complicate in quanto lo studio non è effettuato con la teoria delle sorgenti puntiformi bensì con quella delle sorgenti estese che possono essere condizionate dalla presenza o meno di diffusori o proiettori. Anche la distribuzione spettrale della lampada può essere alterata da elementi ausiliari quali ottiche, diffusori e lenti.

Le tecniche di misurazione presenti nella norma insieme alla classificazione delle categorie di rischio fornirà una base sia per i produttori che per gli utenti finali. Lo scopo dello standard è quello di fornire una tecnica standardizzata per la valutazione della radiazione potenzialmente pericolosa per l'essere umano.

CAPITOLO 1: RICHIAMI DI TEORIA

1.1 FLUSSO LUMINOSO

È la grandezza derivata dal flusso energetico pesato con la curva di risposta fotopica e poi integrato nello spettro del visibile.

L'unità di misura è il *lumen* ed il simbolo usato è Φ_v .

$$\Phi_v = 683 \cdot \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (1.1)$$

Dove $V(\lambda)$ è la curva di sensibilità (figura 1.1).

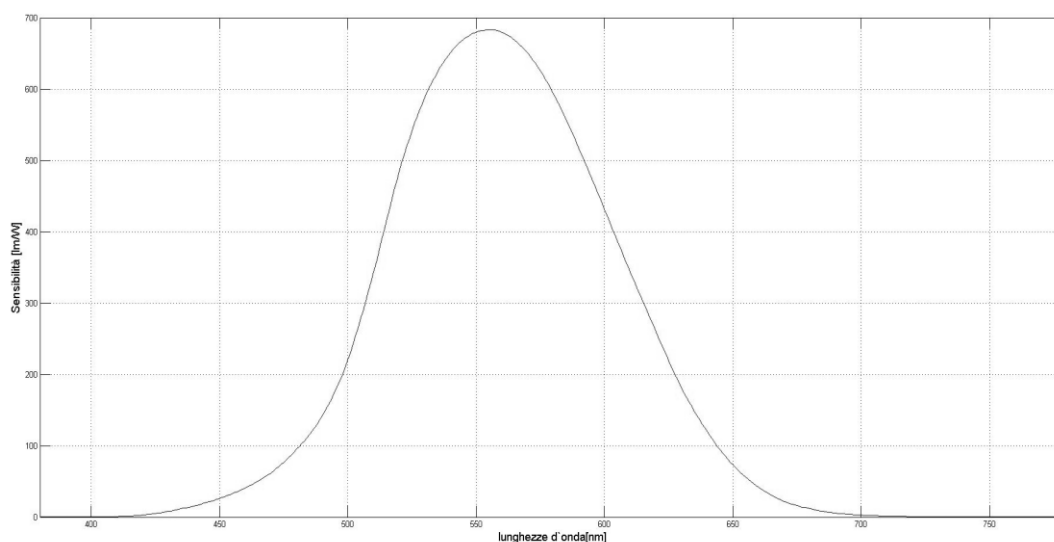


Figura 1.1 Curva di sensibilità fotopica

1.2 ILLUMINAMENTO (DI UN PUNTO SU UNA SUPERFICIE)

Quoziente tra il flusso luminoso $d\Phi_v$ ricevuto da un elemento di superficie contenente il punto, e l'area dA dell'elemento stesso.

L'unità di misura è il *lux* ed il simbolo utilizzato è E_v

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \quad (1.2)$$

1.3 IRRADIANZA (DI UN PUNTO SU UNA SUPERFICIE)

Quoziente tra il flusso radiante $d\Phi$ ricevuto da un elemento di una superficie contenente il punto e l'area dA dell'elemento stesso.

L'unità di misura è $W \cdot m^{-2}$ ed il simbolo utilizzato è E

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (1.3)$$

1.4 LUMINANZA (PER UNA DATA DIREZIONE, DI UN PUNTO SU UNA SUPERFICIE)

Quantità definita dalla formula

$$L_v = \frac{d\Phi_v}{dA \cdot d\Omega \cdot \cos \theta} \quad (1.4)$$

Dove $d\Phi_v$ è il flusso luminoso trasmesso da un fascio elementare passante per il punto dato e che si propaga nell'angolo solido $d\Omega$ contenente la direzione data; dA è l'area di una sezione del fascio contenente il punto; θ è l'angolo tra la normale alla sezione presa in esame e la direzione del fascio.

L'unità di misura è $cd \cdot m^{-2}$

1.5 RADIANZA (PER UNA DATA DIREZIONE, DI UN PUNTO SU UNA SUPERFICIE)

Quantità definita dalla formula

$$L = \frac{d\Phi}{dA \cdot d\Omega \cdot \cos \theta} \quad (1.5)$$

Dove $d\Phi$ è la potenza radiante (flusso) trasmesso da un fascio elementare passante per il punto dato e che si propaga nell'angolo solido $d\Omega$ contenente la direzione data; dA è l'area di una sezione del fascio contenente il punto; θ è l'angolo tra la normale alla sezione presa in esame e la direzione del fascio.

L'unità di misura è $W \cdot m^{-2} \cdot sr$

1.6 IRRADIANZA SPETTRALE

Quoziente tra la potenza radiante $d\Phi_{(\lambda)}$ in un intervallo di lunghezza d'onda $d\lambda$, incidente su di un elemento della superficie e l'area dell'elemento per l'intervallo $d\lambda$.

L'unità di misura è $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$ ed il simbolo utilizzato è E_λ

$$E_{\lambda} = \frac{d\Phi(\lambda)}{dA \cdot d\lambda} \quad (1.6)$$

1.7 RADIENZA SPETTRALE (PER UN INTERVALLO DI LUNGHEZZE D'ONDA $d\lambda$, IN UNA DATA DIREZIONE, PER UN DATO PUNTO)

Rapporto tra la potenza radiante $d\Phi_{(\lambda)}$ che attraversa il punto e si propaga all'interno dell'angolo solido $d\Omega$ nella data direzione e il prodotto dell'intervallo di lunghezza d'onda $d\lambda$ per l'area della sezione del raggio su un piano perpendicolare a questa direzione ($\cos\theta \cdot dA$) contenente il punto e l'angolo solido $d\Omega$.

L'unità di misura è $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1} \cdot sr^{-1}$ ed il simbolo utilizzato è L_{λ}

$$L_{\lambda} = \frac{d\Phi(\lambda)}{dA \cdot d\Omega \cdot \cos \theta \cdot d\lambda} \quad (1.7)$$

CAPITOLO 2: ANALISI DELLA NORMATIVA

La normativa nasce come guida CIE per la valutazione della sicurezza fotobiologica provocata da lampade o sistemi di illuminazione poi resa norma dalla IEC.

Di seguito vedremo i livelli che tale norma prende in considerazione, come calcolarli e come analizzare i dati al fine di classificare correttamente l'oggetto esaminato.

2.1 ANGOLO SOTTESO DALLA SORGENTE

È noto che la porzione di area che l'occhio osserva dipende dal tempo in cui è effettuata tale operazione ovvero, quando pensiamo di osservare un punto in realtà l'occhio esegue dei piccoli movimenti osservando così non un punto ma una porzione di area attorno al punto stesso. Per questo motivo l'angolo da prendere in considerazione dipende dal tempo di esposizione.

Tuttavia per non avere infiniti valori vengono fornite delle leggi tempo-varianti entro un range di angoli.

Vediamoli nel dettaglio:

- $\alpha_{min}=0,0017 \text{ rad}$, angolo minimo per tempi di esposizione inferiori a 0,25s
- $\alpha_{min}=0,011 \text{ rad}$, angolo minimo per tempi di esposizione superiori a 0,25s
- $\alpha_{eff} = \alpha_{min} \cdot \sqrt{\frac{t}{0,25}}$, per tempi di esposizione compresi tra 0,25s e 10s (2.1)

- $\alpha_{eff} = \alpha_{min} \cdot \sqrt{\frac{t}{100}}$, per tempi di esposizione compresi tra 100s e 10000s (2.2)

- $\alpha_{max}=0,1 \text{ rad}$, per tempi di esposizione maggiori

Per le sorgenti oblunghe (ad esempio tubi fluorescenti) l'angolo è determinato come rapporto tra la media aritmetica delle dimensioni geometriche della superficie emittente e la distanza di visione che vedremo più avanti come viene valutata.

2.2 LIMITI DI ESPOSIZIONE

2.2.1 Limite di esposizione attinica ai raggi UV per la pelle e gli occhi

Premesso che per attinica si intende una luce che è in grado di creare cambiamenti chimico-fisici su un materiale fotosensibile, che in questo caso sono pelle ed occhi, il valore limite si riferisce alla dose di radiazione ultravioletta incidente sulla pelle, o su gli occhi, non protetta ricevuta per un tempo non superiore ad 8 ore e vale $30 \text{ J} \cdot \text{m}^2$ valutato come segue:

$$E_s \cdot t = \sum_{200}^{400} \sum_t E_{\lambda}(\lambda, t) \cdot S_{UV}(\lambda) \cdot \Delta t \cdot \Delta \lambda \leq 30 \text{ J} \cdot \text{m}^2 \quad (2.3)$$

dove:

$E_{\lambda}(\lambda, t)$ è l'irradianza spettrale in $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$

$S_{UV}(\lambda)$ è la funzione peso per l'attinica ultravioletta

$\Delta\lambda$ è la larghezza di banda

t è il tempo di esposizione espresso in secondi

La funzione peso attinica $S_{UV}(\lambda)$, è mostrata, in forma grafica, qui di seguito (figura 2.1, in *allegato A* si trova una tabella con i valori della stessa alle diverse lunghezze d'onda).

Il tempo massimo di esposizione alla radiazione ultravioletta incidente su occhi e pelle non protetti, può essere calcolata come segue:

$$t_{\max} = \frac{30}{E_S} \quad \text{s} \quad (2.4)$$

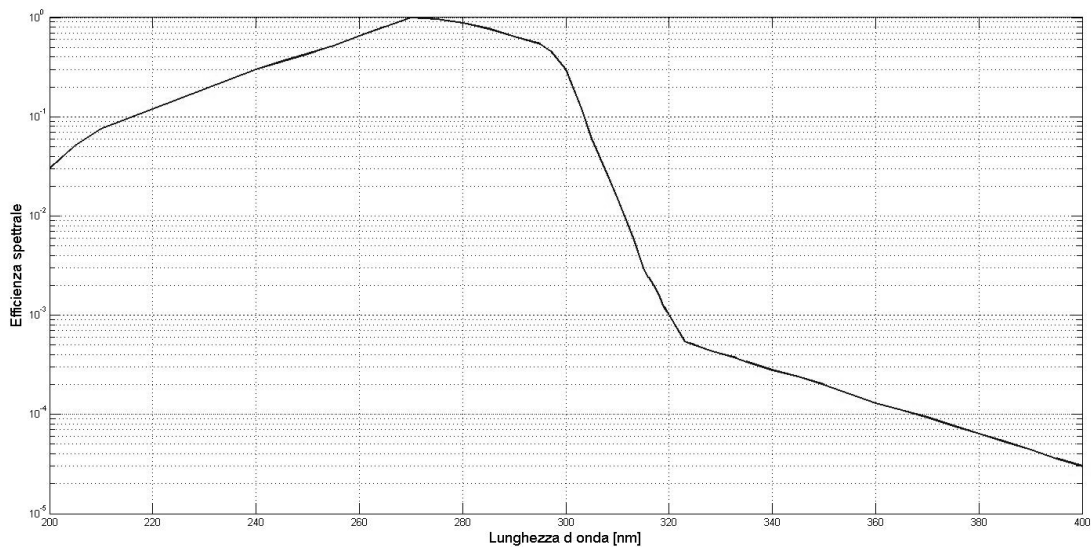


Figura 2.1 Funzione peso spettrale, $S_{UV}(\lambda)$, per i danni attinici su pelle ed occhi dovuti ai raggi UV

2.2.2 Limite di esposizione per gli occhi ai raggi vicino-UV

Per la regione spettrale compresa tra 315 nm e 400 nm (zona UV-A) il valore complessivo dell'energia d'esposizione sull'occhio non dovrebbe eccedere i $10000 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ per tempi di esposizione inferiori a 1000 s. Per tempi maggiori l'irradianza nella zona UV-A per l'occhio non protetto, E_{UVA} , non dovrebbe superare i $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Queste specifiche possiamo esprimerle secondo le relazioni:

$$E_{UVA} \cdot t = \sum_{315}^{400} \sum_t E_{\lambda(\lambda, t)} \cdot \Delta t \cdot \Delta \lambda \leq 10000 \quad \text{J} \cdot \text{m}^{-2} \quad (t < 1000 \text{s}) \quad (2.5)$$

$$E_{UVA} \leq 10 \quad \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \quad (t \geq 1000 \text{s}) \quad (2.6)$$

Il tempo massimo permesso per l'esposizione alla radiazione ultravioletta incidente sull'occhio non protetto per tempi inferiori a 1000 s può essere valutato così:

$$t_{\max} \leq \frac{10000}{E_{UVA}} \quad (2.7)$$

2.2.3 Limiti di esposizione per i danni provocati da luce blu

Per proteggersi contro danni fotochimici alla retina dovuti all'esposizione alla luce blu, l'integrale della radianza spettrale pesato con la funzione $B(\lambda)$ (figura 2.2, in *allegato B* la tabella), cioè $L(\lambda)$, non dovrebbe eccedere i livelli così definiti:

$$L_B \cdot t = \sum_{300}^{700} \sum_t L_{\lambda(\lambda,t)} \cdot B_{(\lambda)} \cdot \Delta t \cdot \Delta \lambda \leq 10^6 \quad \text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \quad (t < 1000 \text{s}) \quad (2.8)$$

$$L_B = \sum_{300}^{700} L_{(\lambda)} \cdot B_{(\lambda)} \cdot \Delta \lambda \leq 100 \quad \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \quad (t \geq 1000 \text{s}) \quad (2.9)$$

Per una sorgente con radianza di luce blu, L_B , oltre il valore $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ il massimo tempo di esposizione può essere valutato nel seguente modo:

$$t_{\max} = \frac{10^6}{L_B} \quad \text{s} \quad (t \leq 10^4 \text{s}) \quad (2.10)$$

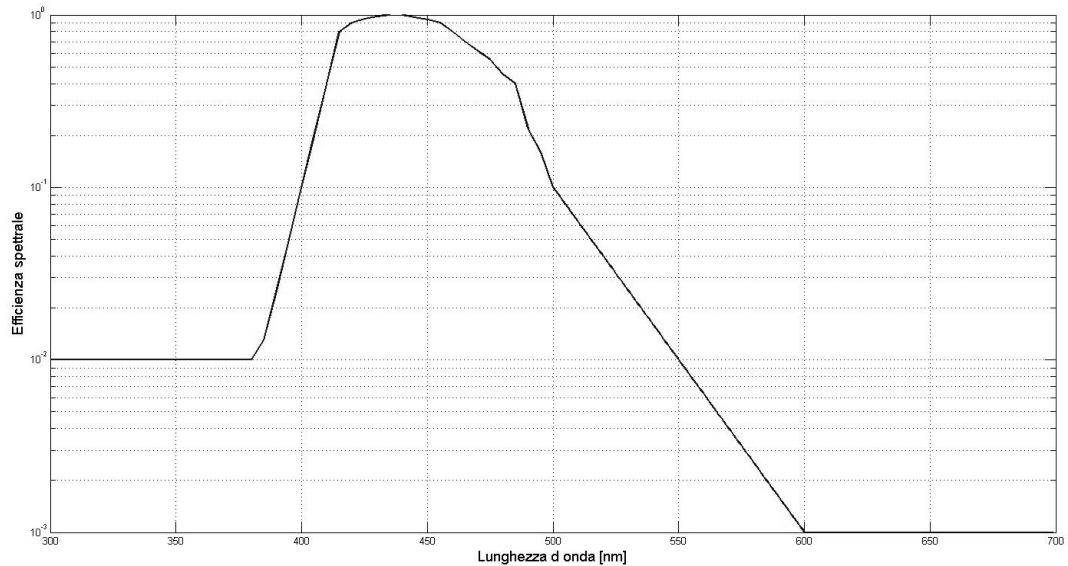


Figura 2.2 Funzione peso spettrale, $B(\lambda)$, per i danni termici

2.2.4 Limiti di esposizione per i danni alla retina dovuti alla luce blu in caso di piccole sorgenti

Per piccole sorgenti si intendono quelle lampade che sottendono un angolo solido minore di 0,011 radianti. I limiti introdotti nel paragrafo 1.2.3 portano a relazioni semplificate basate sull'analisi dell'irradianza spettrale invece che della radianza dato che per sorgenti puntiformi vale la relazione:

$$E = L \cdot \Omega \quad (2.2)$$

Con angoli sotesi inferiori a 0,011 radianti, il passaggio da radianza a irradianza è legata dall'angolo solido che vale all'incirca 10^{-4} .

Perciò l'irradianza spettrale, pesata con la funzione $B_{(\lambda)}$, non dovrebbe superare i seguenti limiti

$$E_B \cdot t = \sum_{300}^{700} \sum_t E_{\lambda(\lambda,t)} \cdot B_{(\lambda)} \cdot \Delta t \cdot \Delta \lambda \leq 100 \quad \text{J} \cdot \text{m}^{-2} \quad (t < 100\text{s}) \quad (2.11)$$

$$E_B = \sum_{300}^{700} E_{(\lambda)} \cdot B_{(\lambda)} \cdot \Delta \lambda \leq 1 \quad \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \quad (t \geq 100\text{s}) \quad (2.12)$$

Per una sorgente con irradianza di luce blu, E_B , eccede il valore 0,01 Wm^{-2} il massimo tempo di esposizione può essere valutato nel seguente modo:

$$t_{\max} = \frac{100}{E_B} \quad \text{s} \quad (t \leq 100 \text{ s}) \quad (2.13)$$

2.2.5 Limiti di esposizione per i danni alla retina dovuti a irraggiamento

Per proteggersi dai danni dovuti al riscaldamento della retina, la radianza spettrale della sorgente, L_{λ} , pesata con la curva peso $R_{(\lambda)}$ (vedi figura 2.3 , in *allegato C* la tabella), non dovrebbe superare i seguenti limiti:

$$L_R = \sum_{380}^{1400} L_{\lambda} \cdot R_{(\lambda)} \cdot \Delta t \leq \frac{50000}{\alpha \cdot t^{0,25}} \quad \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \quad (10\mu\text{s} \leq t \leq 10\text{s}) \quad (2.14)$$

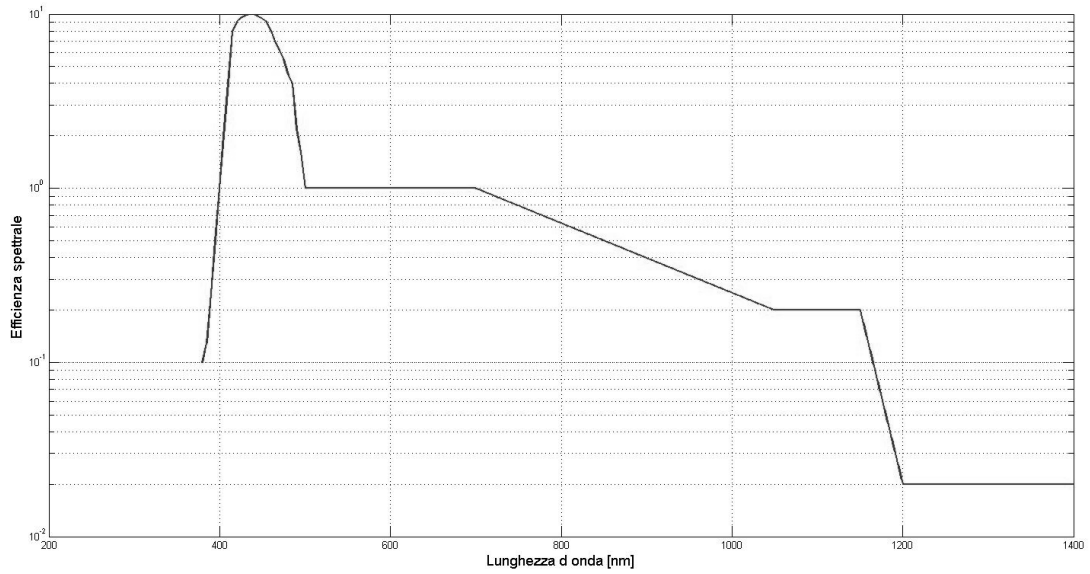


Figura 2.3 Funzione peso spettrale, $R(\lambda)$, per i danni termici

2.2.6 Limiti di esposizione per i danni alla retina dovuti al rischio termico-debole stimolo visivo

Per una lampada ad infrarossi o per qualunque altra lampada che emetta nel vicino infrarosso e che il debole stimolo sia insufficiente a generare un segnale sul nervo ottico, la radianza del vicino infrarosso, L_{IR} , vista dall'occhio per tempi maggiori di 10 s dovrebbero essere limitati a :

$$L_{IR} = \sum_{780}^{1400} L_{\lambda} \cdot R_{(\lambda)} \cdot \Delta t \leq \frac{6000}{\alpha} \quad \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \quad (t > 10 \text{ s}) \quad (2.15)$$

2.2.7 Limiti di esposizione per i danni all'occhio dovuti alla radiazione infrarossa

Per prevenire danni dovuti al riscaldamento della cornea e possibili danni futuri sulle lenti dell'occhio (catarattogenesi), l'esposizione dell'occhio alla radiazione infrarossa, E_{IR} , dai 780nm ai 3000 nm, per tempi inferiori a 1000 s, non dovrebbero superare i seguenti limiti:

$$E_{IR} = \sum_{780}^{3000} E_{\lambda} \cdot \Delta \lambda \leq 18000 \cdot t^{-0,75} \quad \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \quad (t \leq 1000 \text{ s}) \quad (2.16)$$

Per tempi superiori il limite diventa:

$$E_{IR} = \sum_{780}^{3000} E_{\lambda} \cdot \Delta \lambda \leq 100 \quad \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \quad (t > 1000 \text{ s}) \quad (2.17)$$

2.2.8 Limiti di esposizione per i danni alla pelle dovuti al rischio termico

La radiazione visibile e infrarossa (da 380nm a 3000nm) sulla pelle dovrebbe essere limitata a:

$$E_H \cdot t = \sum_{780}^{1400} E_{\lambda(\lambda,t)} \cdot \Delta t \cdot \Delta \lambda \leq 20000 \cdot t^{0,25} \quad \text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \quad (t \leq 10 \text{ s}) \quad (2.18)$$

2.3 CLASSI DI RISCHIO DEGLI ILLUMINANTI

Dovendo confrontare dati provenienti da misure su lampade molto diverse tra loro, basti pensare alle densità potenze messe in gioco da una lampada ad alogenuri ed una a led, la norma fornisce i valori ai quali riportare o effettuare le misure.

Per quanto riguarda lampade ad uso generale, i valori di rischio dovrebbero essere riportati, sia radianza che irradianza, ad una distanza tale da avere un illuminamento di 500 lux e comunque ad una distanza non inferiore a 200 mm.

Per tutte le altre lampade i valori vanno riportati a 200 mm.

2.3.1 Esonerato dal gruppo

Il principio base per poter esonerare un illuminante dal rischio è che lo stesso non superi nessuno dei seguenti punti:

- non sia un rischio per quanto riguarda la luce ultravioletta attinica (E_S) entro una finestra temporale di 8 ore (30000 s), né
- un pericolo per il vicino ultravioletto (E_{UVA}) entro 1000s, (circa 16 minuti) né
- un pericolo alla retina dovuto alla luce blu (L_B) entro 10000s, (circa 2,8 ore) né
- un pericolo alla retina dovuto al riscaldamento (L_R) entro 10 s, né
- un pericolo dovuto alla radiazione infrarossa per l'occhio (E_{IR}) entro 1000s.

Queste lampade sono lampade prive di rischi e quindi esonerate dalla classificazione in gruppi.

Anche le lampade che emettono radiazione infrarossa ma di debole entità (cioè, inferiore a $10 \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$) e che non sono pericolose per il vicino infrarosso (L_{IR}) entro 1000 s, appartengono a questo gruppo.

2.3.2 Gruppo di Rischio 1(basso rischio)

Il principio base per poter inserire in questo gruppo un illuminante è che lo stesso non sia fonte di pericolo durante il suo normale utilizzo o nelle normali condizioni di esposizione. Tali requisiti sono soddisfatti da una lampada che superi i livelli del gruppo di esonero ma che non supera nessuno dei seguenti punti:

- non sia fonte di pericolo per luce ultravioletta attinica (E_S) entro 10000 s, né
- un pericolo nel vicino ultravioletto (E_{UVA}) entro 300 s, né
- un pericolo alla retina dovuto alla luce blu (L_B) entro 100 s, né
- un pericolo alla retina dovuto a riscaldamento (L_R) entro 10 s, né
- un pericolo dovuto alla radiazione infrarossa per l'occhio (E_{IR}) entro 100 s.

Queste lampade appartengono al Gruppo di Rischio 1(basso rischio) e non presentano rischio nelle normali condizioni di lavoro.

Anche le lampade che emettono radiazione infrarossa ma di debole entità (cioè, inferiore a $10\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$) e che non sono pericolose per il vicino infrarosso(L_{IR}) entro 100 s, appartengono a questo gruppo.

2.3.3 Gruppo di Rischio 2(rischio moderato)

La base per poter inserire in questo gruppo un illuminante è che lo stesso non sia fonte di pericolo dovuto alla risposta di avversione a fonti di luce molto luminosa o a causa di un disagio termico.

Tali requisiti sono soddisfatti da una lampada che superi i livelli del Gruppo di Rischio 1 ma che non supera nessuno dei seguenti punti:

- non sia fonte di pericolo per luce ultravioletta attinica (E_S) entro 1000 s, né
- un pericolo nel vicino ultravioletto (E_{UVA}) entro 100 s, né
- un pericolo alla retina dovuto alla luce blu (L_B) entro 0,25 s, né
- un pericolo alla retina dovuto a riscaldamento (L_R) entro 0,25 s, né
- un pericolo dovuto alla radiazione infrarossa per l'occhio (E_{IR}) entro 10 s.

Queste lampade appartengono al Gruppo di Rischio 2 (rischio moderato) e non presentano rischio nelle condizioni di riflesso naturale di avversione alla luce o effetti termici.

Anche le lampade che emettono radiazione infrarossa ma di debole entità (cioè, inferiore a $10\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$) e che non sono pericolose per il vicino infrarosso(L_{IR}) entro 10 s, appartengono a questo gruppo.

2.3.4 Gruppo di Rischio 3 (alto rischio)

La base per poter inserire in questo gruppo un illuminante è semplice: la lampada può essere pericolosa persino per brevi o momentanee esposizioni.

Tutte le lampade che superano i limiti, uno o più, del Gruppo di Rischio 2 appartengono al Gruppo di Rischio 3(alto rischio) e sono pericolose le sole esposizioni momentanee.

| Rischio | Curva peso | Simbolo | Limiti di emissione | | | Unità |
|--------------------------------|-------------------|-----------|---------------------|----------------|------------------|---|
| | | | Esonerato | Basso rischio | Rischio moderato | |
| UV Attinico | $S_{UV}(\lambda)$ | E_S | 0,001 | 0,003 | 0,03 | $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ |
| Vicino UV | | E_{UVA} | 10 | 33 | 100 | $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ |
| Luce Blu | $B(\lambda)$ | L_B | 100 | 10000 | 4000000 | $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ |
| Luce Blu piccole sorgenti | $B(\lambda)$ | E_B | 1 | 1 | 400 | $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ |
| Retina termico | $R(\lambda)$ | L_R | $28000/\alpha$ | $28000/\alpha$ | $71000/\alpha$ | $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ |
| Retina termico, stimolo debole | $R(\lambda)$ | L_{IR} | $6000/\alpha$ | $6000/\alpha$ | $6000/\alpha$ | $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ |
| Radiazione IR, sull'occhio | | E_{IR} | 100 | 570 | 3200 | $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ |

Tabella 2.1 Dati riassuntivi per la classificazione della lampada sul rischio foto biologico

CAPITOLO 3: STRUMENTI DI MISURA

Di seguito sono riportati gli strumenti utilizzati per effettuare le misurazioni e una loro breve descrizione.

3.1 GONIOFOTOMETRO

Il goniometro è uno strumento usato per la misurazione delle intensità luminose nelle diverse direzioni. L'oggetto in prova, dopo essere stato fissato alla struttura e centrato rispetto all'asse di rotazione (questo permette di mantenere costante la distanza tra l'oggetto da studiare e il sensore), viene acceso e posso procedere con l'acquisizione delle intensità. Quello verrà registrato, non saranno letture dirette di intensità, bensì letture di corrente in quanto i valori di intensità sono ricavati per via indiretta attraverso misure di illuminamento. Nota la corrente, la costante del fotodiodo e la distanza posso ricavare l'intensità come segue:

$$I = \frac{B}{K_E} \cdot (dist)^2 \quad (3.1)$$

Dove:

- B , è il valore di corrente dato dal fotodiodo
- K_E , è la costante del fotodiodo
- $dist$, è la distanza tra l'oggetto in prova e il sensore

Da queste misure si può facilmente risalire al flusso emesso dalla lampada, integrando i valori di intensità rispetto all'angolo solido di emissione, come mostrato analiticamente e in *Figura 3.1*

$$\Phi_v = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\vartheta=0}^{\pi} I_v(\vartheta, \varphi) d\vartheta d\varphi \quad (3.2)$$

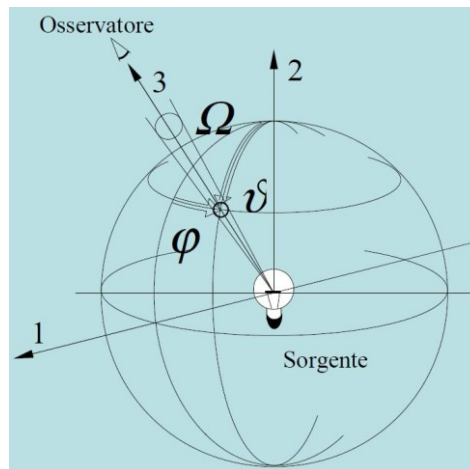


Figura 3.1

3.2 SPETTRORADIOMETRO

Questo particolare strumento permette di conoscere la distribuzione spettrale (da 380 nm a 780 nm) della potenza irradiata entro un certo angolo solido; i dati che ottengo sono delle radianze spettrali. Nel particolare si è utilizzato un KONICA MINOLTA CS-1000A (Figura 3.2)



Figura 3.2

Le caratteristiche principali sono:

- Precisione della lunghezza d'onda: $\pm 0,3$ nm
- Angolo di accettazione: 1°
- Accuratezza: $\pm 2\% + 1 \text{dgt}$ (valutata con illuminante A)

3.3 LUXMETRO

Questo strumento permette di valutare il flusso per unità di area illuminata, i *lux* appunto. Il modello utilizzato è un KONICA MINOLTA T-10 palmare (Figura 3.3).



Figura 3.3

Le caratteristiche principali sono:

- Fotocellula al silicone
- Caratteristiche di correzione del coseno: entro $\pm 1\%$ a 10° ; entro $\pm 2\%$ a 30° ; entro $\pm 6\%$ a 50° ;
entro $\pm 7\%$ a 60° ; entro $\pm 25\%$ a 80°
- Accuratezza: $\pm 2\% + 1 \text{dgt}$

3.4 RADIOMETRO

Un radiometro è un dispositivo (sensore passivo) utilizzato in radiometria per misurare il flusso della radiazione elettromagnetica emesso da una superficie o un oggetto. Sebbene il termine sia spesso usato per dispositivi che misurano la radiazione infrarossa, si può usare anche per ogni rilevatore che operi ad ogni lunghezza d'onda dello spettro elettromagnetico; ad esempio nel caso in questione, è

stato utilizzato un “*DELTA OHM HD-9021*” per valutare la presenza di radiazione ultravioletta, attraverso tre sonde:

- Sonda UV-A *LP-9021*, radiazione nel vicino ultravioletto da 400 nm a 315 nm
- Sonda UV-B *LP-9021*, radiazione da 315nm a 280 nm
- Sonda UV-C *LP-9021*, radiazione da 280 nm a 200 nm

Le caratteristiche principali sono:

- Precisione strumento: $\pm 0,1 \text{ rdg} \pm 1 \text{ digit}$ riferito alla temperatura di $25^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$
- Precisione sonde radiometriche: $\pm 4\%$
- Linearità : $\pm 1\%$

3.5 PIRANOMETRO

Il piranometro fa parte della famiglia dei polarimetri, ovvero quegli strumenti che misurano la radiazione solare; nello specifico il piranometro misura la radiazione globale ricevuta dal sensore e come segnale fornisce una tensione continua. Si è pensato di utilizzare tale strumento per verificare la presenza di radiazione infrarossa in quanto la risposta spettrale dello strumento seguiva molto bene il range fornito dalla normativa.

Il principio di funzionamento è alquanto semplice, il piranometro si basa su un sensore a termopila. La superficie sensibile della termopila è coperta con vernice nera opaca che permette al piranometro di non essere selettivo alle varie lunghezze d’onda. L’energia radiante è assorbita dalla superficie annerita della termopila, creando così una differenza di temperatura tra il centro della termopila (giunto caldo) ed il corpo del piranometro (giunto freddo). La differenza di temperatura tra giunto caldo e giunto freddo è convertita in una differenza di potenziale grazie all’effetto Seebeck.

Nel caso in questione si è utilizzato un “*DELTA OHM PYRA 03*”, sensore passivo, con risposta spettrale mostrata in *Figura 3.3*.

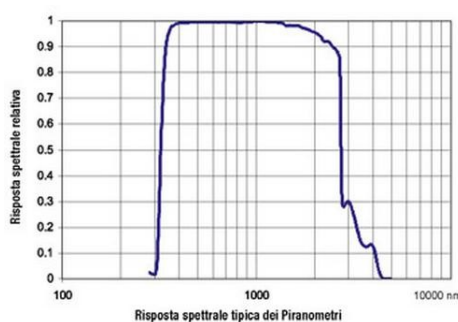


Figura 3.3

Le caratteristiche principali sono:

- Sensibilità tipica : $10\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$
- Campo di vista : $2\pi\text{sr}$
- Campo spettrale: 305 nm ÷ 2800 nm (50%)
335 nm ÷ 2200 nm (95%)
- Diametro sensore: 32mm

3.6 LUXMETRO DI PRECISIONE

Questo componente è utilizzato per la valutazione dell'intensità luminosa (*vedi §3.1*). Lo strumento calibrato per una certa distanza, che deve mantenersi costante nel tempo, permette di ricavare l'intensità luminosa noto l'illuminamento sul sensore. Nello specifico si è utilizzato un rivelatore di fotocorrente “*LMT S1000*” accoppiato con fotorivelatore (*Figura 3.4*).



Figura 3.4

L'incertezza introdotta dallo strumento vale $< 0,30\%$ Lettura ± 2 dgt

CAPITOLO 4: TIPOLOGIE DI LAMPADE

4.1 LAMPADE FLUORESCENTI

Sono lampade a scarica in gas a bassa pressione, molto versatili e adatte a molteplici usi. Sono caratterizzata da bassi consumi, buona qualità di luce emessa e dalla lunga vita.

Il principio di funzionamento è basato sulla conversione della radiazione ultravioletta in radiazione visibile da parte di fosfori gli elettroni; come mostrato in *Figura 4.1* gli elettrodi riscaldandosi iniziano ad emettere elettroni che,essendo accelerati dal campo elettrico, andranno a formare un fascio ionizzato. Una volta fatto ciò posso far avvenire una scarica, di tipo diffusa e mantenerla per poter far emettere al gas (solitamente un gas nobile mescolato ad una piccola quantità di mercurio) radiazioni nell'ultravioletto, tipicamente a 257,7nm. Il contenitore è rivestito da polveri fluorescenti a trifosfori (per avere indice di resa $R_a < 80$) o multi fosfori (con $R_a > 90$) che permettono alla radiazione non visibile di diventare visibile. Durante questa trasformazione si ha un inevitabile perdita di energia, in quanto la radiazione visibile ha una energia/frequenza inferiore a quella ultravioletta, sottoforma di calore.

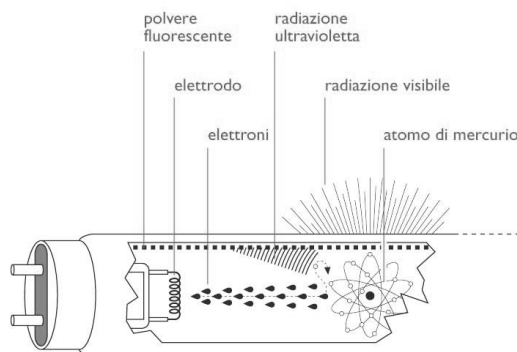


Figura 4.1 Spaccato di una lampada lineare a fluorescenza

Caratteristiche tipiche:

Efficienza: 65÷90 lm/W

Temperatura di colore: 2700÷6500 K

Durata di vita: 5000÷20000 ore

Indice R_a : 60÷90

Spettro di emissione indicativo:

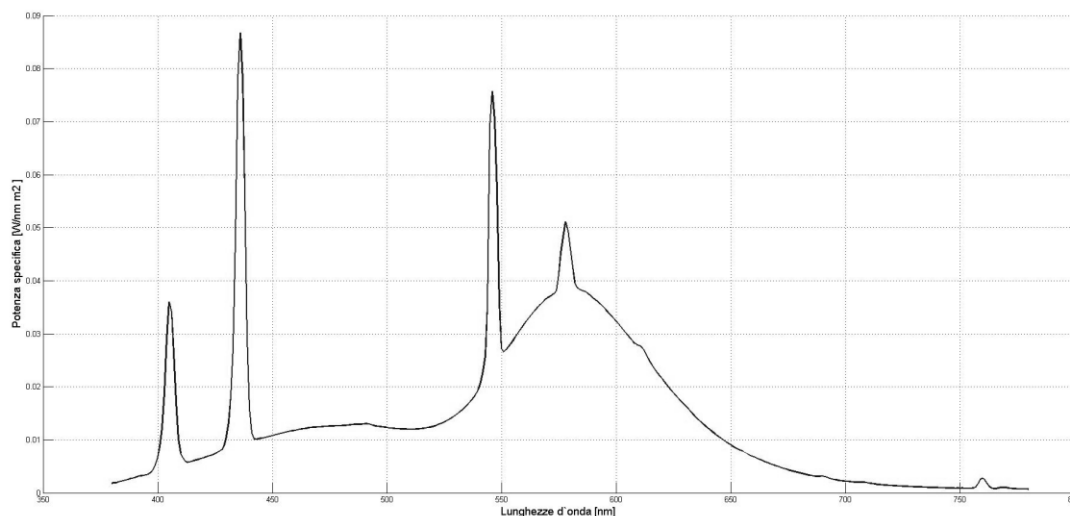


Figura 4.2 Spettro di una lampada fluorescente da 36W, 3500K

4.2 LAMPADE AD INCANDESCENZA

Le lampade comunemente chiamate "a incandescenza" o "a filamento" sono sorgenti di luce artificiale che stanno via via scomparendo vista la loro bassa efficienza energetica.

Il principio di funzionamento è alquanto semplice: un metallo ridotto a sottilissimo filamento è inserito in un bulbo di vetro dove, dopo essere stato praticato il vuoto spinto, è inserita una certa quantità di gas inerte (*Figura 4.3*). Facendovi scorrere della corrente, continua od alternata, il filamento si surriscalda fino a raggiungere l'incandescenza dove ha inizio l'emissione di radiazioni luminose insieme ad una elevata quantità di radiazioni infrarosse.

Il cuore di questa lampada è il filamento che è sottoposto a notevoli stress termici, tipicamente composto da uno dei seguenti metalli: platino, iridio e tungsteno.

Vale la pena ricordare che nonostante l'elevata diffusione di questa tipologia di illuminante la sua efficienza luminosa è molto bassa, attorno ai 13 lm/W mentre in termini energetici non supera il 3%.



Figura 4.3 Elementi tipici di una lampada ad incandescenza

Caratteristiche tipiche:

Efficienza: $11 \div 13 \text{ lm/W}$

Temperatura di colore: $2000 \div 3000 \text{ K}$

Durata di vita: 1000 ore

Indice Ra: 100

Spettro di emissione tipico:

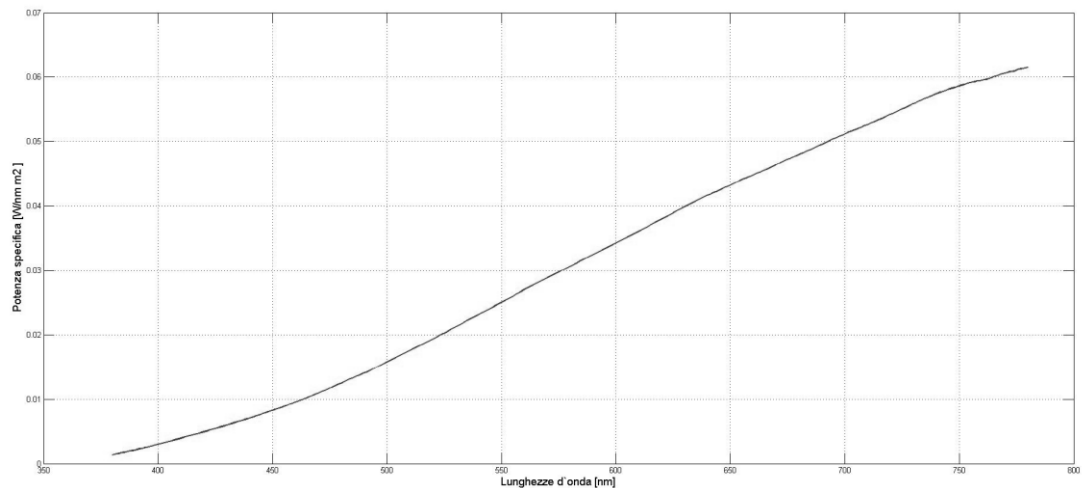


Figura 4.4 Spettro tipico di una lampada incandescente

4.3 LAMPADE ALOGENE

Sono lampade ad incandescenza che all'interno del bulbo, oltre ai gas inerti, hanno un gas alogeno (Figura 4.5) come iodio, bromo, xeno, kripton, i quali determinano un sensibile incremento di efficienza luminosa, qualità di emissione nonché durata di vita. Nelle alogene il tungsteno che evapora a causa della temperatura elevata reagisce con il gas formando un alogenuro di tungsteno. Successivamente il composto, entrando in contatto con il filamento incandescente si decompone e rideposita il tungsteno sul filamento stesso realizzando un ciclo, il *ciclo alogeno*. In questo modo la durata di vita di una lampada alogena può essere almeno doppia di una lampadina ad incandescenza normale, sebbene il filamento sia molto più caldo.

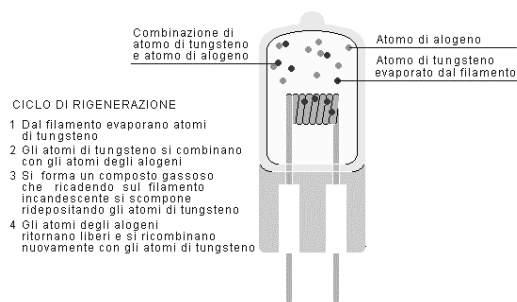


Figura 4.5 Elementi tipici di una lampada alogena

Poiché il bulbo, per permettere la reazione chimica tra alogeno e tungsteno, deve avere una temperatura non inferiore a 250 °C, viene utilizzato un vetro speciale (“vetro borosilicato” o impropriamente quarzo) ad alta resistenza.

Caratteristiche tipiche:

Efficienza: 13÷22 lm/W

Temperatura di colore: 2000÷3000 K

Durata di vita: 2000÷3000 ore

Indice Ra: 100

Spettro di emissione tipico:

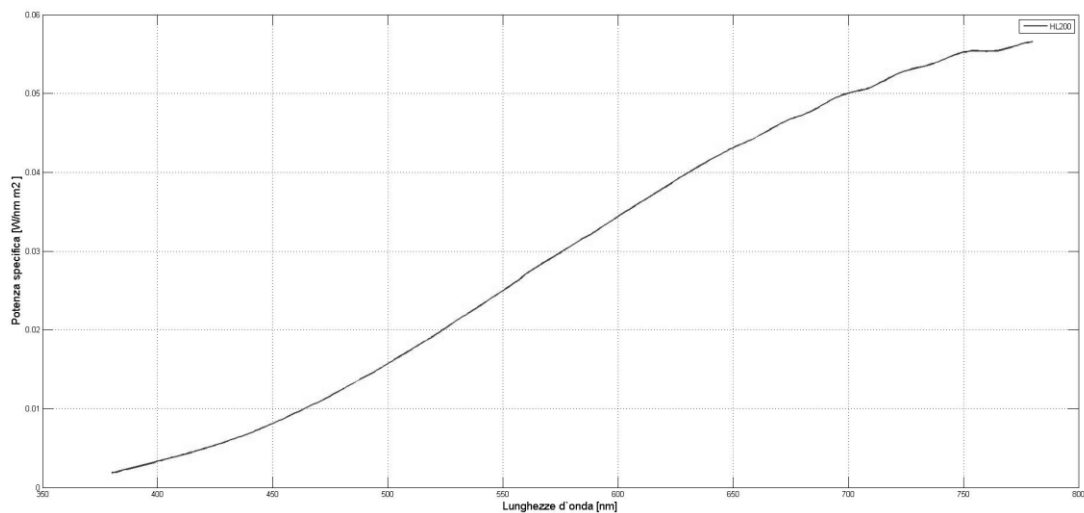


Figura 4.6 Spettro di emissione di una lampada alogena,
da notare la forte somiglianza con una
lampada incandescente

4.4 LAMPADE AD ALOGENURI

Questo tipo di lampada fa parte della grande famiglia delle lampade a scarica (Figura 4.7). È costituita principalmente da un bulbo di vetro al cui interno è presente un tubo di scarica in quarzo che a sua volta racchiude vapori di mercurio o di sodio ad alta pressione ed una miscela di ioduri metallici, come iodio, tallio, indio, disprosio, olmio, cesio, tulio.

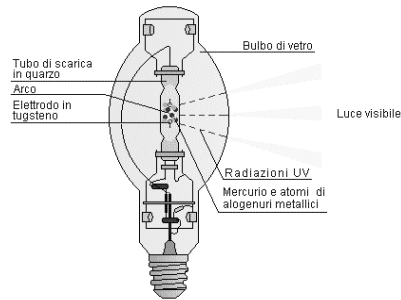


Figura 4.7 Elementi tipici di una lampada ad alogenuri

Caratteristiche tipiche:

Efficienza: 40÷100 lm/W

Temperatura di colore: 4000÷6000 K

Durata di vita: 6000÷20000 ore

Indice Ra: 65÷90

Spettro di emissione indicativo:

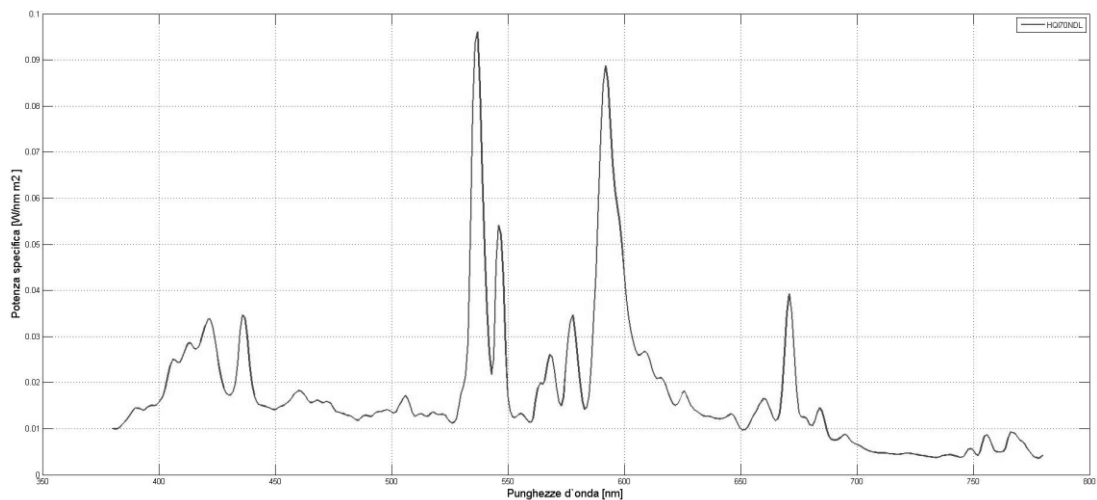


Figura 4.8 Spettro tipico di emissione di una lampada ad alogenuri metallici

4.5 LAMPADE A MERCURIO

Anche questo tipo di lampada fa parte della famiglia delle lampade a scarica, le caratteristiche principali di questa lampada sono la buona affidabilità e le discrete prestazioni cromatiche che possono essere migliorate modificando il rivestimento di polveri fluorescenti necessarie anche qui alla conversione da radiazione ultravioletta a visibile (*Figura 4.9*).

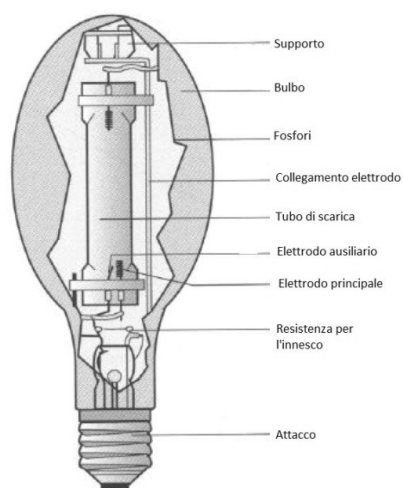


Figura 4.9 Elementi tipici di una lampada a mercurio

Caratteristiche tipiche:

Efficienza: $<60 \text{ lm/W}$

Temperatura di colore: $4000 \div 5000 \text{ K}$

Durata di vita: $\sim 10000 \text{ ore}$

Indice Ra: ~ 50

Spettro di emissione tipico:

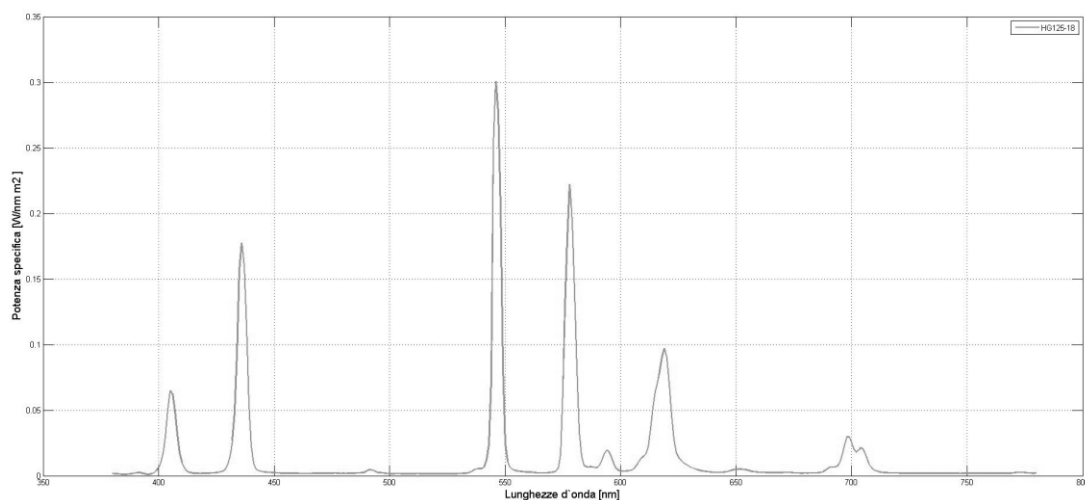


Figura 4.10 Spettro tipico di una lampada a mercurio,
si noti la forte emissione a righe

4.6 LAMPADE A LED

Il LED, o meglio diodo ad emissione luminosa, è un particolare tipo di illuminante che sfrutta le proprietà ottiche di alcuni materiali semiconduttori per produrre fotoni attraverso il fenomeno dell'emissione spontanea ovvero a partire dalla ricombinazione di coppie elettrone-lacuna (Figura 4.11).

Sono caratterizzati dal fatto che la radiazione che emettono è praticamente tutta nella banda del visibile. I LED sono sempre più utilizzati in ambito illuminotecnico in sostituzione di alcune sorgenti di luce tradizionali. Il loro utilizzo nell'illuminazione domestica, quindi in sostituzione di lampade ad incandescenza, alogene o fluorescenti compatte (comunemente chiamate a risparmio energetico), è oggi possibile con notevoli risultati raggiunti grazie alle tecniche innovative sviluppate nel campo. Attraverso i nuovi studi, infatti, l'efficienza luminosa è cresciuta di molto. Fondamentalmente, il limite dei LED per questo tipo di applicazione è la quantità di luce emessa (flusso luminoso per singolo LED), che nei modelli di ultima generazione per uso professionale si attesta intorno ai 120 lm/W, ma che nei modelli più economici raggiunge solo i 20 lm/W, per questo motivo si sceglie una struttura ad array di LED oppure a multigiunzione, per la costruzione di lampade sostitutive.

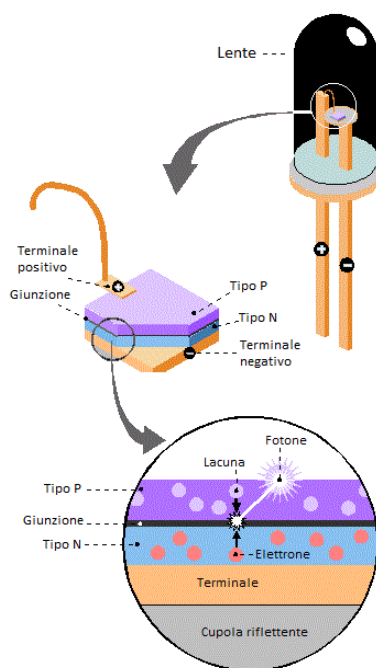


Figura 4.11 Particolare della zona di giunzione

Caratteristiche tipiche:

Efficienza: 10÷120 lm/W

Temperatura di colore: 3000÷9000 K

Durata di vita: 10000÷100000 ore

Indice Ra: 60÷80

Spettro di emissione indicativo:

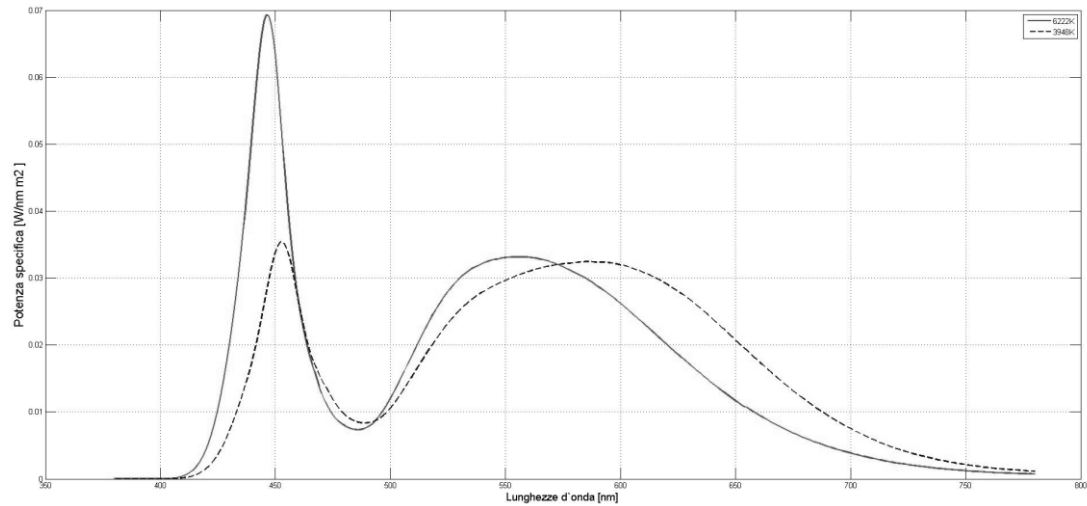


Figura 4.12 Spettri di emissione di due LED, in viola è rappresentato un led a luce “fredda” da 6200K, mentre in blu uno a luce più “calda” da 3800K

CAPITOLO 5 : PROVE DI LABORATORIO

5.1 METODO CONSIGLIATO DALLA NORMA

5.1.1 Misure di irradianza

La descrizione si applica sia all'analisi con sonde a larga banda che misure spettrali. Le misure vanno effettuate con sensori di diametro (D) compreso tra 7 mm e 50 mm, tipicamente si usa un sensore da 25 mm dato che è la misura standard di molte apparecchiature. Nelle misure devo includere, se necessario, lo schermo atto a limitare il campo visivo in quanto devo rispettare i valori di angolo α previsti dalla norma (A corrisponde ad $\alpha/2$); una volta definito angolo e distanza (H) alla quale effettuare le misure posso agevolmente calcolare l'apertura del diaframma.

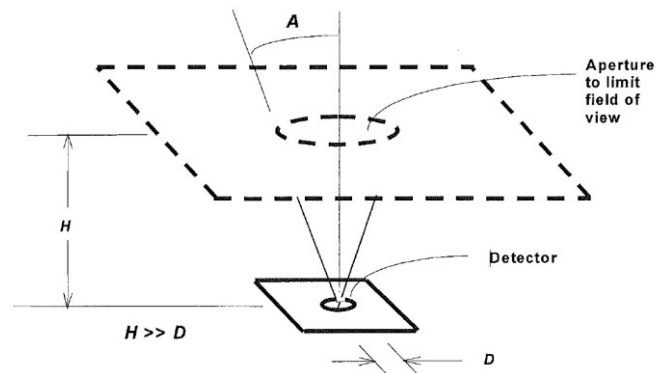


Figura 5.1 Schema di misura di irradianza

5.1.2 Misure di radianza

La valutazione della radianza è più difficile della valutazione dell'irradianza in quanto nella sua valutazione concorrono parametri quali angolo solido ed area emettente (Figura 5.2).

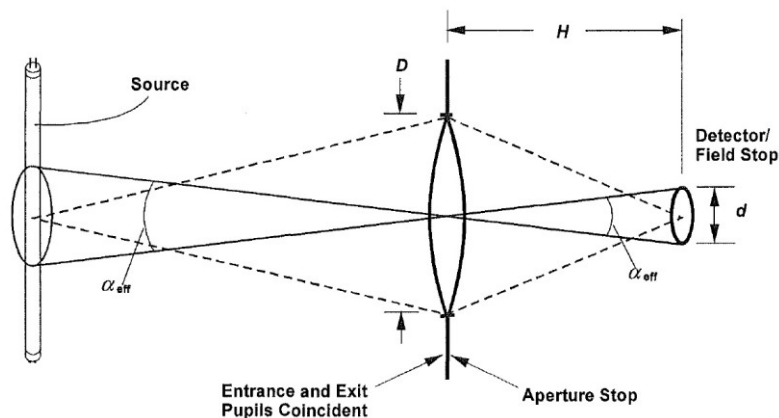


Figura 5.2 Schema di misura per la radianza

La norma prevede anche un metodo alternativo: la misura di radianza può essere concettualizzata come una misura di irradianza effettuata conoscendo molto bene l'angolo solido di visuale, in seguito il valore di irradianza verrà diviso per l'angolo solido ottenendo il valore di radianza.

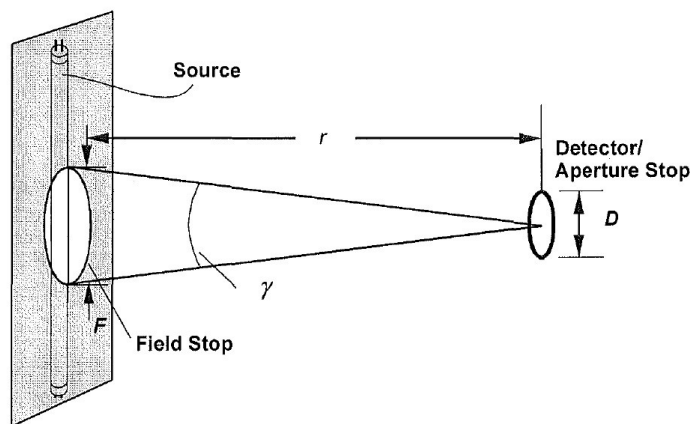


Figura 5.3 Schema alternativo per la valutazione della radianza

Il valore di radianza, sia quello a banda larga che spettrale, è ricavato così:

$$L = E \cdot \frac{4}{\pi \cdot \gamma^2} \quad (5.1)$$

dove a γ corrisponde l'angolo α_{eff} .

La IEC 62471 suggerisce l'uso di un doppio monocromatore in quanto è l'unico in grado di raggiungere una elevata selettività, inferiore a 10^{-4} tra energia passante ed energia fuori banda (calibrandolo con una lampada a Tungsteno). L'uso di due monocromatori, in cascata, è da imputare al fatto che questa configurazione permette di migliorare le caratteristiche di dispersione dell'apparato diminuendo la luce diffusa nel reticolo. L'uso di un singolo monocromatore può essere adottato laddove venga comprovato che l'emissione di radiazione ultravioletta e infrarossa sia nulla.

5.2 MODELLO ANALIZZATO SEMPLIFICATO

L'analisi alternativa consiste nel trovare un metodo più pratico, veloce e soprattutto più economico.

Di seguito lo studio delle lampade è stato effettuato partendo da ipotesi semplificative (che quasi sempre hanno conferma nella realtà) ed arrivando ai valori richiesti dalla norma per via indiretta.

Una analisi indiretta è spesso ricca di incertezza in quanto risente della propagazione delle incertezze, tuttavia quello che ci si è proposti di fare è di valutare le grandezze richieste e ritenersi soddisfatti qualora queste rientrassero entro un errore del 100%.

Lo studio è partito da un tipo di lampada presente in laboratorio, un tubo a led, per poi estenderne il concetto alle altre tipologie. Prima di applicare il metodo alternativo sono stati eseguiti dei calcoli teorici considerando un modello ideale della lampada.

I dati di partenza sono :

- Analisi spettro radiometrica
- Valutazione del flusso luminoso emesso

Le ipotesi semplificative introdotte sono:

- Indipendenza della distribuzione spettrale dalla direzione
- Emissione Lambertiana della sorgente
- Lampada omogenea

Dalla misura spettro radiometrica ricavo una distribuzione spettrale della radianza. Per valutare la distribuzione spettrale della potenza $\Phi_{(\lambda)}$ utilizzo il valore fornito dallo spettro radiometro, che essendo un valore relativo, posso associarlo ad una distribuzione di potenza relativa $\Phi^*_{(\lambda)}$. Pesando tale distribuzione di potenza con la curva di sensibilità fotopica ed integrandola ottengo Φ_v , un flusso che posso chiamare normalizzato. Allora la distribuzione di potenza associata al flusso totale Φ_v sarà:

$$\Phi(\lambda) = \Phi^*_{(\lambda)} \cdot \frac{\Phi_v}{\Phi_{vn}} \quad (5.2)$$

Se supponiamo inoltre che l'emettitore sia Lambertiano possiamo scrivere:

$$I = I_0 \cdot \cos \vartheta \quad (5.3)$$

valido anche spettralmente

$$I_{(\lambda)} = I_{0(\lambda)} \cdot \cos \vartheta \quad (5.4)$$

Dalla teoria sappiamo che l'intensità luminosa la si può ricavare noto il flusso luminoso e l'angolo solido attraverso il quale viene emesso φ , che nel caso del tubo corrisponde a 2π :

$$\Phi = \iint I_{0(\lambda)} \cdot d\vartheta \cdot d\varphi \quad (5.5)$$

Dove ottengo:

$$\Phi = I_{0(\lambda)} \cdot \Omega \quad (5.6)$$

E sostituendo ottengo:

$$I_{(\lambda)} = \frac{\Phi_{(\lambda)}}{\Omega} \cdot \cos \vartheta \quad (5.7)$$

Considerando la lampada omogenea posso trovare il valore di intensità per unità di lunghezza della lampada, nota la dimensione massima dell'illuminante l_i :

$$I_l = \frac{dI}{dl} = \frac{I_{(\lambda, \gamma)}}{l_t} \quad (5.8)$$

Allora posso scrivere che la radianza puntuale vale l'intensità sull'area emettente, apparente $d_t \cdot \cos \vartheta$:

$$L_{(\lambda)} = \frac{dI/dl}{d_t \cdot \cos \vartheta} = \frac{I_l}{d_t \cdot \cos \vartheta} \quad (5.9)$$

Così facendo, però, considero costante l'intensità lungo la dimensione minore, che nel nostro caso è il diametro d_t , il che non è del tutto surreale dato che il diametro è molto minore rispetto la lunghezza della lampada.

Il valore medio della radianza sulla porzione di area osservata, indicata con A_o , si ottiene integrando lungo tutta la lunghezza del tubo e mediando sull'area, ovvero :

$$\bar{L}_{(\lambda)} = \frac{1}{A_o} \int_{-l/2}^{l/2} L_{(\lambda, \vartheta, l)} \cdot d_t \cdot dl \quad (5.10)$$

Sostituendo le espressioni viste in precedenza ottengo:

$$\bar{L}_{(\lambda)} = \frac{1}{A_o} \int_{-l/2}^{l/2} \frac{I_l}{d_t \cdot \cos \vartheta} \cdot d_t \cdot dl = \frac{1}{A_o} \cdot \int_{-l/2}^{l/2} \frac{\Phi_{(\lambda)}/\Omega \cdot \cos \vartheta}{\cos \vartheta} \cdot \frac{1}{l_t} \cdot dl = \frac{1}{A_o} \cdot \int_{-l/2}^{l/2} \frac{\Phi_{(\lambda)}}{\Omega} \cdot \frac{1}{l_t} \cdot dl \quad (5.11)$$

Infine dalle ipotesi di partenza posso arrivare all'espressione finale

$$\bar{L}_{(\lambda)} = \frac{\Phi_{(\lambda)}}{\Omega} \cdot \frac{1}{A_o} = \frac{I_{(\lambda)}}{A_o} \quad (5.12)$$

Espressa in $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$

Il valore di $L_{(\lambda)}$ è il valore di radianza spettrale da inserire nelle relazioni 2.8, 2.9, 2.14, 2.15 per ricavare le grandezze richieste.

Facendo delle misure di intensità luminosa si è verificato quanto il modello rispecchi quello Lambertiano, condizione tipicamente rispettata dalla maggior parte delle lampade, confrontandolo con il valore di intensità che ottengo per via analitica e sono state effettuate le opportune correzioni. Tale percorso è stato scelto per le altre lampade a LED analizzate dove al posto di valutare il flusso si misura direttamente la massima intensità luminosa e, una volta riportata al valore corretto, si sostituisce al posto dell'espressione 5.6.

I valori di irradianza sono stati valutati noto l'angolo solido sotto il quale vedo l'oggetto in quanto per vale la legge:

$$E = L \cdot \Omega \quad (5.12)$$

La verifica dei dati ottenuti deve essere effettuata sulla base delle misure con il monocromatore ed un fotorelevatore. Questa analisi porta con sé altri problemi, quali:

- ordini superiori di diffrazione dovuti al monocromatore
- calibrazione del monocromatore
- risposta spettrale non unitaria del foto rilevatore

Per sopperire al problema degli ordini di diffrazione diversi dal primo si devono anteporre all'ottica dello strumento adeguati filtri per selezionare le frequenze da inviare al rilevatore, in quanto l'analisi di un picco ad una lunghezza d'onda di 800nm, ad esempio, darebbe luogo a due picchi secondari a 400nm e 1200nm che se non adeguatamente filtrati falserebbero le misure.

La calibrazione raccomandata dalla norma del monocromatore è bene sia effettuata mediante lampade a scarica di deuterio per la regione degli ultravioletti mentre per il visibile e il vicino infrarosso una lampada al tungsteno o tungsteno-alogeno.

La risposta non unitaria del rilevatore richiede la conoscenza della sua risposta spettrale alle lunghezze d'onda sulle quali andrà a lavorare cosicché i dati ottenuti possano essere corretti secondo la propria legge di variazione della sensibilità.

5.2.1 Incertezze di misura

Il metodo adottato essendo una variante semplificata della norma è soggetto ad incertezze maggiori dato che le grandezze richieste sono ricavate per via indiretta. Lo scopo di questo metodo è di cercare una via semplificata per la valutazione del rischio pur ammettendo incertezze maggiori e se si rientrerà nei limiti ci riterremo soddisfatti. Tuttavia il metodo una volta convalidato dovrà essere migliorato ed ottimizzato per ridurre tali valori.

Gli strumenti che introducono indeterminazione sono:

- lo spettroradiometro, supponendo che l'incertezza della macchina non dipenda dalla distribuzione spettrale e che sia pari al 4%
- il fotorelevatore per il calcolo dell'intensità luminosa, con incertezza inferiore del 0,3%
- strumento per valutare la distanza, ossia il metro a nastro
- Il luxmetro, con incertezza del 2%

CAPITOLO 6 : ANALISI DATI OTTENUTI

6.1 TUBO A LED

La lampada in prova è un tubo a led in classico formato T8 da 18W (*Figura 6.2*) (in sostituzione ad una lampada fluorescente da 36W) lungo 1200 mm ed avente un diametro di 30mm e temperatura di colore attorno i 3000K (bianco caldo).



Figura 6.2 Tubi con led SMD 3528 disposti su tre file

Caratteristica particolare di questa lampada è l'angolo di emissione del flusso, in quanto a differenza di una normale lampada fluorescente dove il flusso è irradiato su 4π steradiani (facciamo l'approssimazione di una emissione sferica) qui il flusso è irradiato su 2π steradiani visto il particolare montaggio de componenti (*Figura 6.3*)

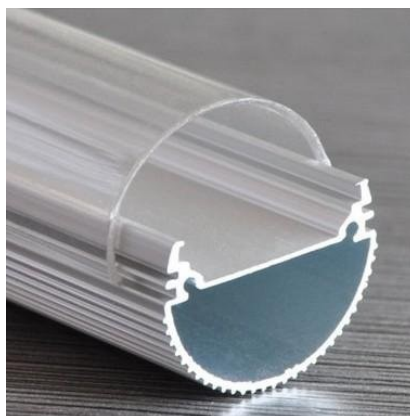


Figura 6.3 Spaccato del profilo di montaggio

I valori ottenuti dalle misure in laboratorio:

- Flusso totale emesso : 1965 lm
- Intensità massima : 600,03 cd
- Radianza spettrale *Figura 6.4*

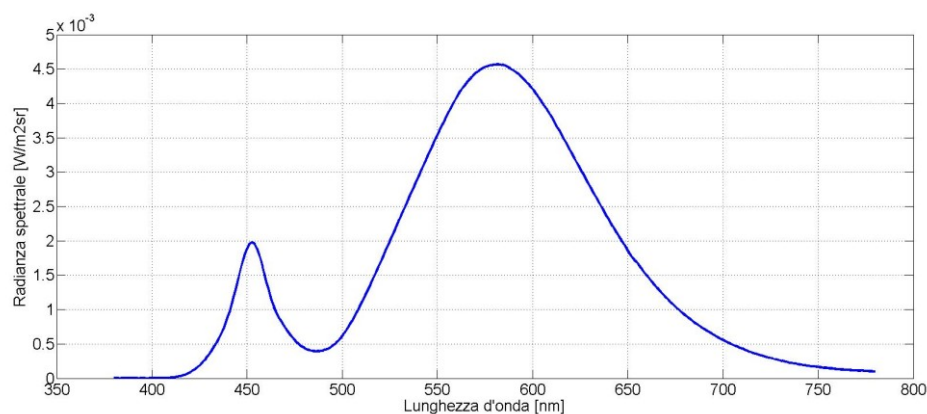


Figura 6.4 Radianza spettrale

Integrando lo spettro misurato e pesato con la curva fotopica, ottengo il valore di Φ_{vn} ; con il valore di flusso emesso Φ_v posso fare il riporto secondo la relazione 5.2 ottenendo la distribuzione di potenza spettrale (*Figura 6.5*).

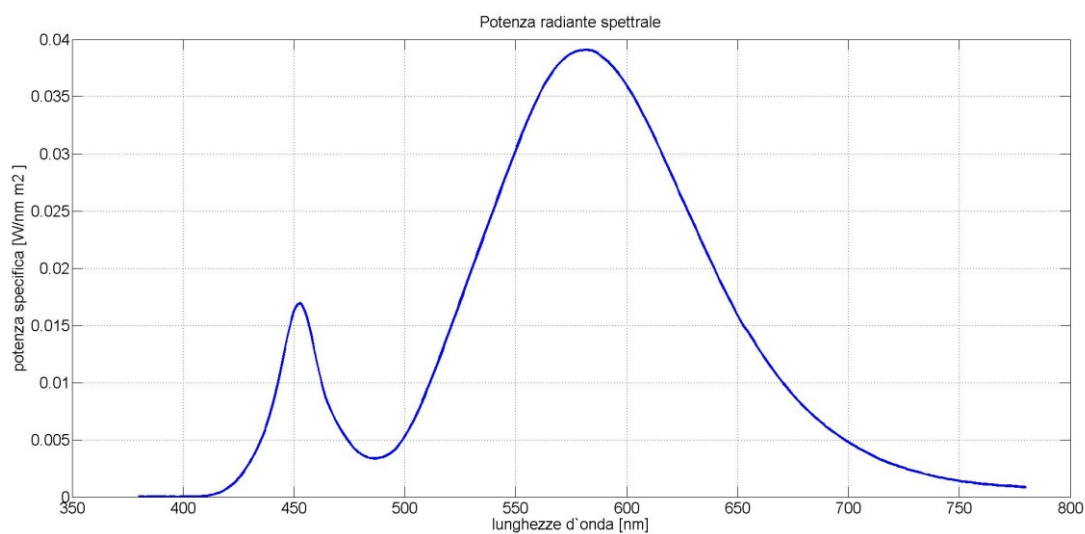


Figura 6.5 Potenza radiante spettrale

L'area di osservazione dipende dalla distanza alla quale ottengo i 500 lx e dall'angolo efficace di osservazione che a sua volta dipende dalle dimensioni della lampada. Per la valutazione dell'angolo efficace la norma consiglia questa strada:

- La dimensione media la calcolo come la media aritmetica delle due dimensioni della superficie emittente, che nel caso del tubo sono 1200x28mm: $Z = (1200 + 30)/2 = 615\text{mm}$

- Il valore di $\alpha_{eff}=Z/r$ dove r corrisponde alla distanza per ottenere i 500 lx, ovvero: $\alpha_{eff}=615/1040=0,59 \text{ rad}$. Dato che questo valore supera il limite massimo di 0,1 rad dovrò usare α_{max} come angolo di visuale

Alla distanza di 1040mm e con un angolo di visuale di 0,1rad corrisponde un'area osservata di 0.00985m²; per completare l'analisi devo tenere conto che all'area osservata non compete tutto il flusso emesso bensì solo una porzione ovvero ad un angolo di 0,1 rad corrisponde una porzione di tubo osservato 10,71 volte più piccola.

Con questo valore di area e la distribuzione spettrale della potenza sostituite nella relazione 5.12 posso ricavare la radianza spettrale $L_{(\lambda)}$ che sostituita alle relazioni 2.8, 2.9, 2.14, 2.15 fornirà i dati da confrontare con i limiti della norma (Tabella 6.1).

| Rischio | Simbolo | Esonerato | Tubo LED | Unità |
|--------------------------------|------------------|-----------|-------------------------|-------------------------------------|
| UV Attinico | E _S | 0,001 | 8,514·10 ⁻¹⁰ | W·m ⁻² |
| Vicino UV | E _{UVA} | 10 | 1,877·10 ⁻⁵ | W·m ⁻² |
| Luce Blu | L _B | 100 | 1,332 | W·m ⁻² ·sr ⁻¹ |
| Luce Blu piccole sorgenti | E _B | 1 | 2,304·10 ⁻² | W·m ⁻² |
| Retina termico | L _R | 28000/α | 2,555·10 ¹ | W·m ⁻² ·sr ⁻¹ |
| Retina termico, stimolo debole | L _{IR} | 6000/α | 0 | W·m ⁻² ·sr ⁻¹ |
| Radiazione IR, sull'occhio | E _{IR} | 100 | 0 | W·m ⁻² |

Tabella 6.1

Per verificare i dati ottenuti si è scelto di passare, piuttosto che attraverso il flusso, attraverso l'intensità luminosa.

Il procedimento è analogo a prima. All'integrale dello spettro misurato con lo spettroradiometro associa una intensità normalizzata e attraverso la 5.2 ottengo una distribuzione di intensità spettrale nota la massima intensità emessa. Attraverso la relazione 5.12 riesco ancora una volta ad ottenere la distribuzione di radianza spettrale.

Attraverso questa strada ottengo i seguenti valori (Tabella 6.2):

| Rischio | Simbolo | Esonerato | Tubo LED | Unità |
|--------------------------------|------------------|-----------|-------------------------|-------------------------------------|
| UV Attinico | E _S | 0,001 | 8,508·10 ⁻¹⁰ | W·m ⁻² |
| Vicino UV | E _{UVA} | 10 | 1,875·10 ⁻⁵ | W·m ⁻² |
| Luce Blu | L _B | 100 | 1,331 | W·m ⁻² ·sr ⁻¹ |
| Luce Blu piccole sorgenti | E _B | 1 | 2,302·10 ⁻² | W·m ⁻² |
| Retina termico | L _R | 28000/α | 2,553·10 ¹ | W·m ⁻² ·sr ⁻¹ |
| Retina termico, stimolo debole | L _{IR} | 6000/α | 0 | W·m ⁻² ·sr ⁻¹ |
| Radiazione IR, sull'occhio | E _{IR} | 100 | 0 | W·m ⁻² |

Tabella 6.2

Possiamo notare come non ci siano differenze sostanziali tra i due metodi se non una variazione massima di -0,11% sul valore di E_{UVA} .

Le misure di intensità sono state effettuate per angoli gamma che vanno da $\pi/2$ (ortogonale alla superficie emettente) a 0 (parallelo alla superficie) per verificare l'ipotesi di emissione Lambertiana; come si può vedere dalla *Figura 6.6* il modello è rispettato in modo quasi perfetto.

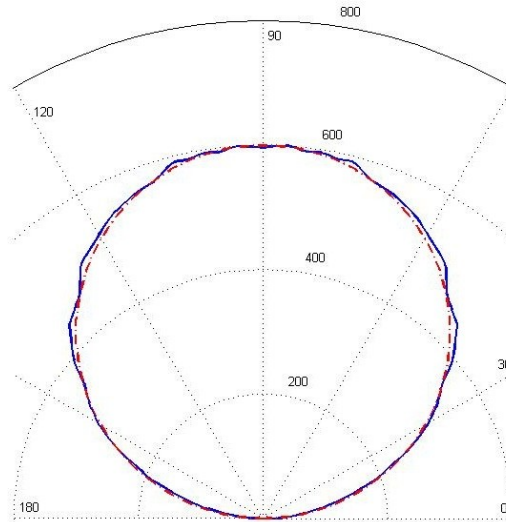


Figura 6.6 Curva di intensità luminosa in funzione dell'angolo gamma, la linea tratteggiata rappresenta l'emissione Lambertiana

Dall'analisi analitica il massimo valore di intensità è di 625cd che differisce dal valore reale del 4%.

Il valore assunto per α_{eff} è pari ad $\alpha_{max}=0,1$ rad viste le dimensioni del tubo.

L'assenza di radiazioni nel vicino infrarosso e nell'infrarosso è comprovato dalla misura effettuata con il piranometro.

Calcolo dell'intensità radiante:

$$I_0 = I_m \cdot \frac{\int X(\lambda) \cdot d\lambda}{\int X(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} = 600 \cdot \frac{0,5968}{227,8} = 1,573 W / sr \quad (6.1)$$

Dove $X(\lambda)$ corrisponde alla radianza valutata con lo spettro radiometro.

L'angolo solido Ω_p sotto il quale vedo il piranometro è 0,000260sr

La potenza irradiata in quel solido vale:

$$P = I_0 \cdot \Omega_p = 1,573 \cdot 260 \cdot 10^{-6} = 0,000456 W \quad (6.2)$$

L'irraggiamento che compete ad un'area pari a quella del piranometro, A_p , vale:

$$E_M = \frac{P}{A_p} = \frac{456 \cdot 10^{-6}}{314 \cdot 10^{-6}} = 1,45 W / m^2 \quad (6.3)$$

L'irraggiamento ricavato col piranometro vale:

$$E_p = 1,35 W / m^2$$

La variazione di stima dell'irraggiamento vale:

$$\Delta E = \frac{E_P - E_M}{E_M} = \frac{1,35 - 1,45}{1,45} = -6,9\% \quad (6.4)$$

Considerando che:

- il piranometro, visto lo scarso irraggiamento, fornisce valori di tensione di alcune decine di microvolt
- non facendo misure a fondo scala con il voltmetro (*AGILENT 34401a*) l'incertezza introdotta ammonta al 18%
- l'intensità varia col coseno dell'angolo rispetto la normale, e che quindi sul sensore vedo un irraggiamento medio

Posso ritenere che il valore di potenza fornita dal piranometro è dovuta alla radiazione visibile e che quindi non vi sia nulla nello spettro dell'infrarosso. Questo ragionamento sarà utilizzato anche nelle lampade successivamente analizzate arrivando alla medesima conclusione.

Per quanto riguarda la radiazione ultravioletta arriviamo a conclusioni simili, in quanto l'analisi con un radiometro accoppiato alle tre tipologie di sonde per UV (A,B,C) permette di dire che questo illuminante non emette nello spettro degli ultravioletti. I valori non nulli di E_S ed E_{UVA} forniti in tabella sono dovuti al fatto che vengono valutati fino ad una lunghezza d'onda di 400nm (vedi relazioni 2.3 e 2.5), valore entro il quale i LED iniziano la loro emissione (*Figura 6.7*).

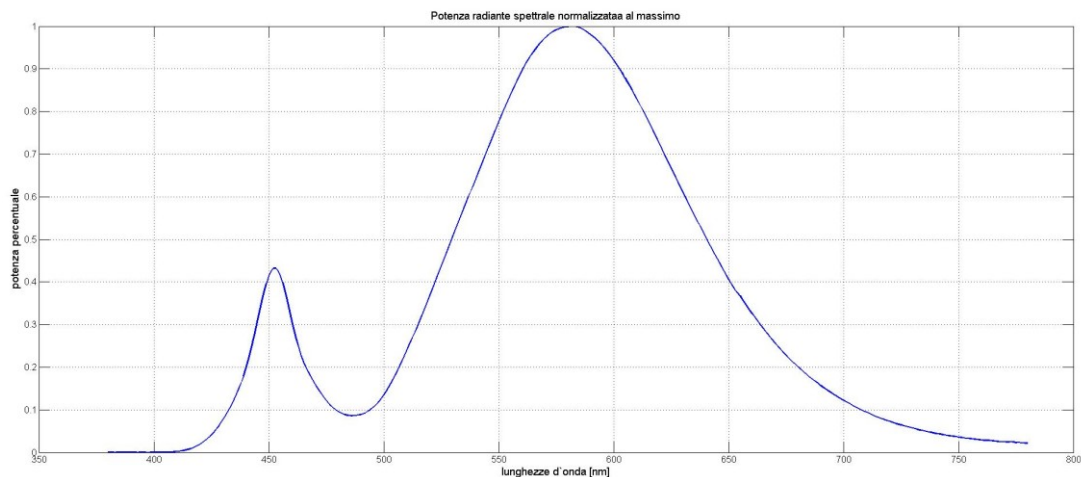


Figura 6.7 Distribuzione spettrale della potenza emessa dal tubo a LED

I valori di radianza sono stati valutati per via analitica, considerando il tubo come un emettitore lineare (*Figura 6.8*), considerando la relazione fornita dal *Palladino [3]*:

$$E = \frac{l \cdot L \cdot A}{l \cdot (\alpha + \sin \alpha \cos \alpha)} = L \cdot 0,0173 \quad (6.5)$$

Dove:

- L è la radianza
- 2α corrisponde ad $\alpha_{MAX}=0,1$ rad
- l è la lunghezza sottesa dall'angolo α_{MAX}
- r' è la distanza per la quale ottengo 500 lux, considerando tutta la lampada
- θ vale zero in quanto la direzione di misura è ortogonale alla superficie e giace sul piano zx

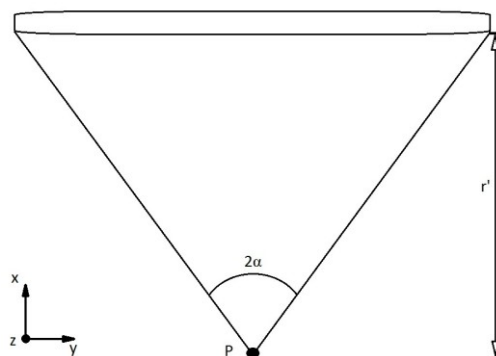


Figura 6.8 Modello di studio

Infine al programma di elaborazione dati è stato chiesto di valutare la potenza irradiata per verificare l'attendibilità dei dati. Per questo tubo da 18W (dato di targa) il valore di potenza irradiata vale 5,15W con un rendimento del 28,6%, in accordo con l'attuale stato dell'arte per quanto riguarda questa tecnologia che di media possiede un rendimento tra 10 e 30%. Anche l'efficienza luminosa rispecchia quelli che sono i valori attuali di questa tecnologia, con un flusso totale emesso di 1965lm otteniamo una efficienza energetica di *110 lm/W*.

6.2 LED PRIVI DI OTTICA

In questo capitolo sono stati analizzati quattro diversi tipi di LED, tutti privi d'apparecchio, caratterizzati dalla loro temperatura di colore:

- 2597 K, bianco extracaldo
- 2968 K, bianco caldo
- 3948 K, bianco freddo
- 6222 K, luce diurna

Per avere dati confrontabili, non si è studiato il singolo LED ma lo studio è stato fatto sostituendo lo spettro dei LED visti nel capitolo precedente con quelli sopra elencati così studiare, con lo stesso tubo e lo stesso flusso, il comportamento con i vari semiconduttori.

Le stesse considerazioni viste prima sono valide ancora adesso in quanto non vi sono particolari picchi di emissione agli estremi della banda della luce visibile che farebbe supporre una qualche presenza di radiazione ultravioletta piuttosto che infrarossa (*Figura 6.9*).

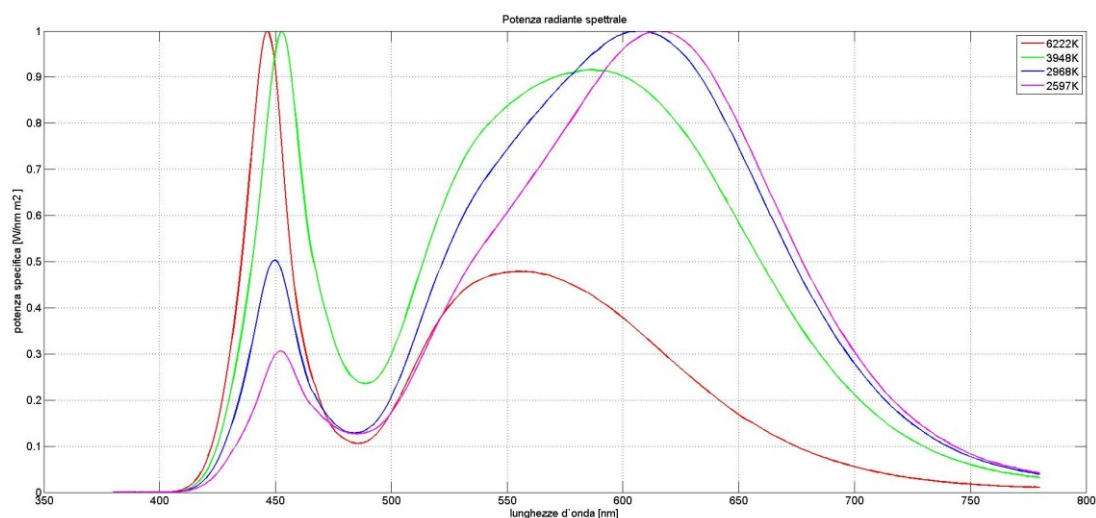


Figura 6.9 Spettri di emissione normalizzati

Passiamo ora all'analisi dei dati per la valutazione del rischio dovuto al danno foto biologico:

| Rischio | Simbolo | Esonerato | LED 2597K | LED 2968K | LED 3948K | LED 6222K | Unità |
|--------------------------------|-----------|----------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| UV Attinico | E_S | 0,001 | $8,008 \cdot 10^{-10}$ | $9,703 \cdot 10^{-10}$ | $9,875 \cdot 10^{-10}$ | $1,822 \cdot 10^{-9}$ | $W \cdot m^{-2}$ |
| Vicino UV | E_{UVA} | 10 | $1,873 \cdot 10^{-5}$ | $2,077 \cdot 10^{-5}$ | $2,233 \cdot 10^{-5}$ | $4,093 \cdot 10^{-5}$ | $W \cdot m^{-2}$ |
| Luce Blu | L_B | 100 | 1,245 | 1,608 | 2,856 | 4,750 | $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ |
| Luce Blu piccole sorgenti | E_B | 1 | $2,154 \cdot 10^{-2}$ | $2,782 \cdot 10^{-2}$ | $4,941 \cdot 10^{-2}$ | $8,217 \cdot 10^{-2}$ | $W \cdot m^{-2}$ |
| Retina termico | L_R | $28000/\alpha$ | $2,849 \cdot 10^1$ | $3,076 \cdot 10^1$ | $4,143 \cdot 10^1$ | $5,821 \cdot 10^1$ | $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ |
| Retina termico, stimolo debole | L_{IR} | $6000/\alpha$ | 0 | 0 | 0 | 0 | $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ |
| Radiazione IR, sull'occhio | E_{IR} | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | $W \cdot m^{-2}$ |

Tabella 6.3

Anche per queste tipologie di led non c'è è motivo di pensare che vi siano particolari emissioni nell'ultravioletto o infrarosso in quanto misure effettuate con sonde ad larga banda non forniscono dati per procedere con ulteriori indagini.

6.3 ALTRE LAMPADE A LED

Di seguito sono analizzate altre tipologie di sistemi illuminanti, dove per sistema si intende il complesso lampada più apparecchio. La richiesta della valutazione del danno foto biologico proveniva da una ditta esterna che commercializza questi tipi di prodotti e che ha richiesto tali caratterizzazioni al laboratorio. Per arrivare ai dati il procedimento utilizzato è lo stesso di quello visto sopra, valutando le intensità massime delle lampade e calcolando l'area di osservazione come previsto dalla norma.

6.3.1 Lampada tipo SWING LED

Questo tipo di lampada è composta da un array di 192 led affiancati tra loro della temperatura di colore approssimativa di 7244K . Dai dati di targa vediamo che la potenza assorbita è di 16W e

dall'elaborazione dei dati scopriamo che la potenza convertita in energia radiante è di $4,19W$ confermando il rendimento dei semiconduttori che si pone attorno al 30%. L'angolo considerato vale $\alpha=0,1 \text{ rad}$, l'intensità massima è di 229,5 cd e la distanza per la quale ottengo i $500lx$ è $1,04m$.

| Rischio | Simbolo | Esonerato |
|--------------------------------|-----------|----------------|
| UV Attinico | E_S | 0,001 |
| Vicino UV | E_{UVA} | 10 |
| Luce Blu | L_B | 100 |
| Luce Blu piccole sorgenti | E_B | 1 |
| Retina termico | L_R | $28000/\alpha$ |
| Retina termico, stimolo debole | L_{IR} | $6000/\alpha$ |
| Radiazione IR, sull'occhio | E_{IR} | 100 |

| SWING LED |
|-----------------------|
| $1,041 \cdot 10^{-8}$ |
| $2,844 \cdot 10^{-4}$ |
| 4,865 |
| $1,061 \cdot 10^{-1}$ |
| $5,701 \cdot 10^1$ |
| 0 |
| 0 |

| Unità |
|--------------------------------|
| $W \cdot m^{-2}$ |
| $W \cdot m^{-2}$ |
| $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ |
| $W \cdot m^{-2}$ |
| $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ |
| $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ |
| $W \cdot m^{-2}$ |

Tabella 6.4

Dalla *Tabella 6.4* si nota come non vi sia motivo di sospettare che tale lampada possa appartenere ad alcuna categoria di rischio se non quella delle esonerate.

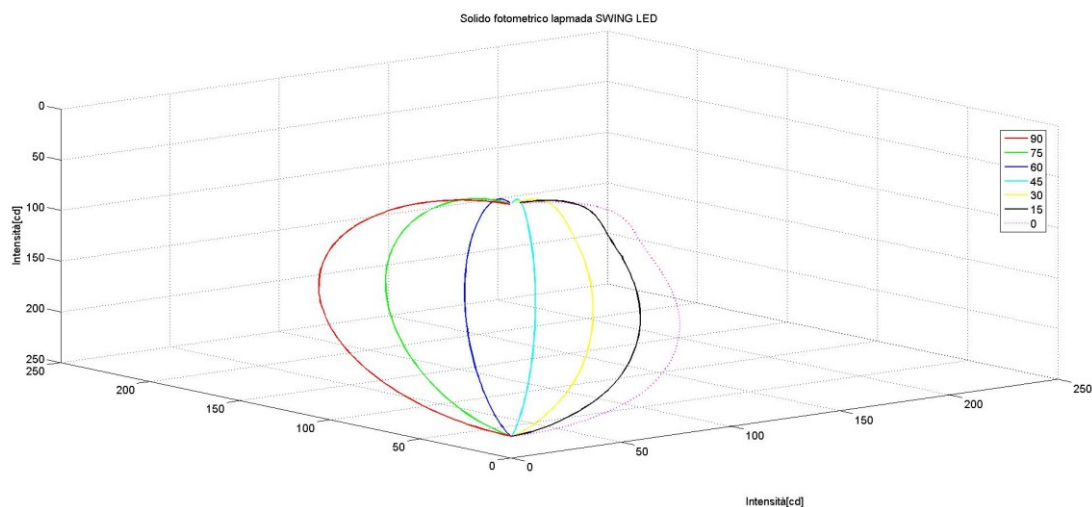


Figura 6.10 Solido fotometrico in coordinate cartesiane

Dalla *Figura 6.11* si può notare come vi sia una forte componente blu che innalza il valore della temperatura di colore e guardando l'andamento dello spettro ai suoi estremi non c'è motivo di supporre la presenza di componente UV ed IR.

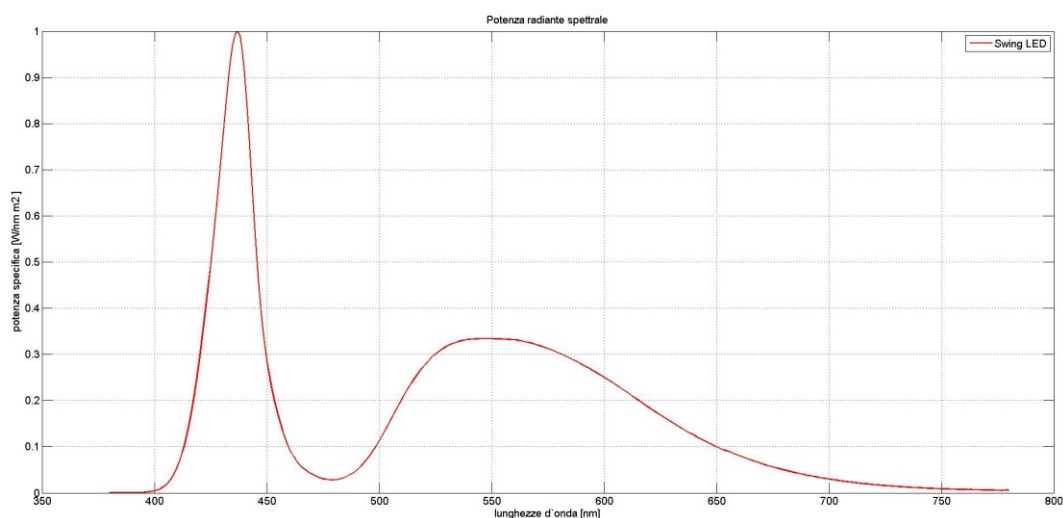


Figura 6.11 Spettro di emissione normalizzato

Per avvalorare quanto detto sopra anche per questa lampada si è misurata l'ipotetica radiazione ultravioletta ed infrarossa con l'ausilio delle sonde precedentemente citate avendo come risultato l'assenza di radiazione ultravioletta e il valore rilevato con il piranometro ($1,56 \text{ W/m}^2$) è da imputare tutto alla radiazione visibile.

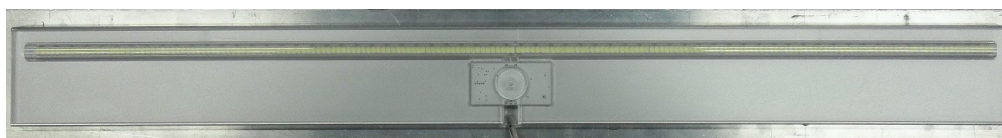


Figura 6.12 Lampada esaminata

6.3.2 Lampada tipo PRISMA LED

Questa lampada è composta da una striscia di 32 LED con una potenza assorbita di $2,5 \text{ W}$ ed una potenza radiante valutata di $0,77 \text{ W}$. L'angolo considerato vale $\alpha = 0,1 \text{ rad}$, l'intensità massima vale $31,3 \text{ cd}$ e la distanza alla quale ottengo i 500 lx è $0,220 \text{ m}$.

| Rischio | Simbolo | Esonerato | PRISMA LED | | Unità |
|--------------------------------|------------------|----------------|-----------------------|--|---|
| UV Attinico | E_S | 0,001 | $1,301 \cdot 10^{-9}$ | | $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ |
| Vicino UV | E_{UVA} | 10 | $2,703 \cdot 10^{-5}$ | | $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ |
| Luce Blu | L_B | 100 | 7,250 | | $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ |
| Luce Blu piccole sorgenti | E_B | 1 | $5,691 \cdot 10^{-2}$ | | $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ |
| Retina termico | L_R | $28000/\alpha$ | $8,166 \cdot 10^1$ | | $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ |
| Retina termico, stimolo debole | L_{IR} | $6000/\alpha$ | 0 | | $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ |
| Radiazione IR, sull'occhio | E_{IR} | 100 | 0 | | $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ |

Tabella 6.5

Anche questa lampada rientra ampiamente nella categoria di rischi degli esonerati.

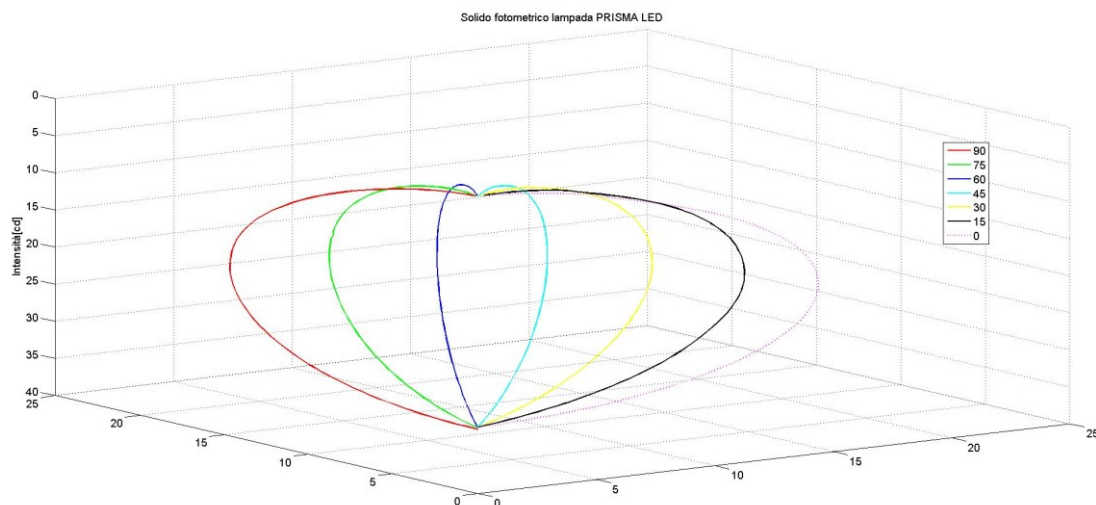


Figura 6.13 Solido fotometrico in coordinate cartesiane

Una curiosità di questa lampada è che la temperatura di colore risulta essere molto alta, $15048K$, un valore insolito ma non del tutto errato soprattutto se andiamo a guardare meglio lo spettro di emissione che si avvicina, in maniera molto approssimata, a quella di un radiatore plankiano. Se accesa sopra ad un foglio bianco si noterà che il è molto freddo con una nota di azzurro.

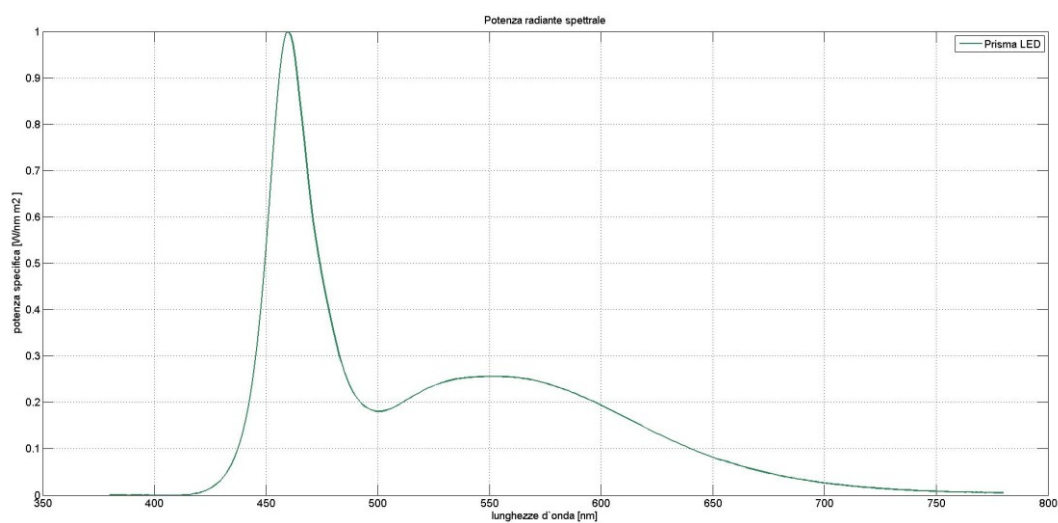


Figura 6.14 Spettro di emissione normalizzato



Figura 6.15 Lampada esaminata

6.3.3 Lampada tipo BLEND-T1

Questa lampada è composta da un LED multi giunzione di $5W$ di potenza ed una potenza radiante valutata di $1,20W$. L'angolo considerato vale $\alpha=0,1 \text{ rad}$, con un'intensità massima di $198,9 \text{ cd}$ e la distanza alla quale ottengo i 500 lx è $0,495m$.

| Rischio | Simbolo | Esonerato |
|--------------------------------|-----------|----------------|
| UV Attinico | E_S | 0,001 |
| Vicino UV | E_{UVA} | 10 |
| Luce Blu | L_B | 100 |
| Luce Blu piccole sorgenti | E_B | 1 |
| Retina termico | L_R | $28000/\alpha$ |
| Retina termico, stimolo debole | L_{IR} | $6000/\alpha$ |
| Radiazione IR, sull'occhio | E_{IR} | 100 |

| BLEND T1 |
|-----------------------|
| $6,138 \cdot 10^{-9}$ |
| $1,279 \cdot 10^{-4}$ |
| $7,652 \cdot 10^1$ |
| $6,122 \cdot 10^{-1}$ |
| $9,929 \cdot 10^2$ |
| 0 |
| 0 |

| Unità |
|--------------------------------|
| $W \cdot m^{-2}$ |
| $W \cdot m^{-2}$ |
| $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ |
| $W \cdot m^{-2}$ |
| $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ |
| $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ |
| $W \cdot m^{-2}$ |

Tabella 6.6

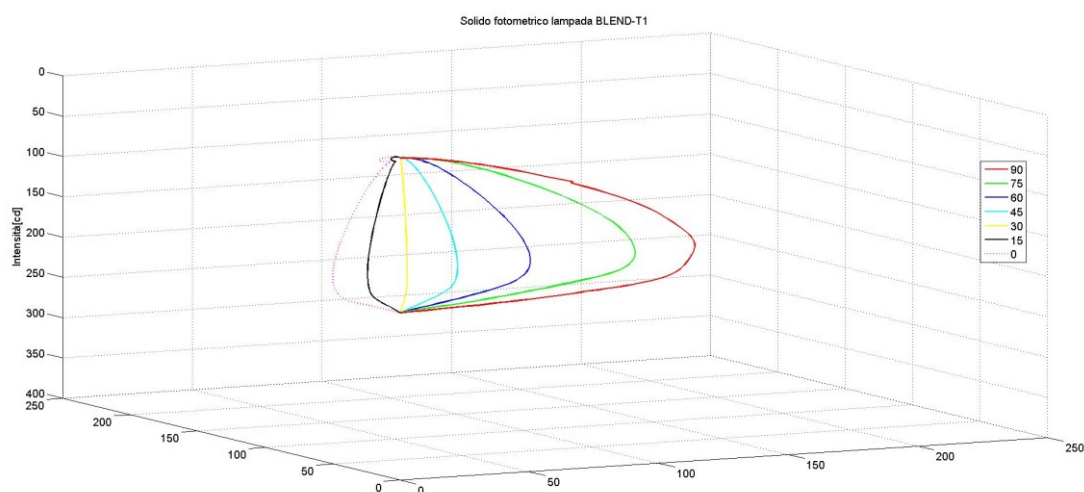


Figura 6.16 Solido fotometrico in coordinate cartesiane

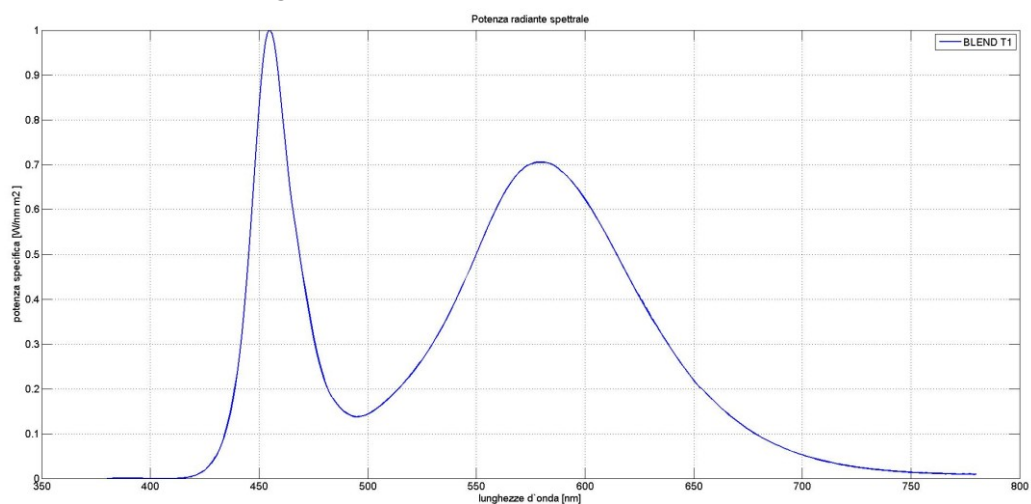


Figura 6.17 Spettro di emissione normalizzato

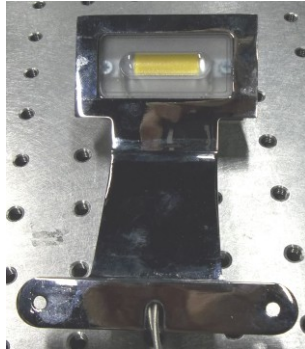


Figura 6.18 Lampada esaminata

A differenza delle lampade precedentemente esaminate, queste hanno mostrato delle particolarità. Se si illumina una superficie bianca, si nota che la cromaticità varia ma non in maniera graduale bensì in maniera quasi discreta. Nello specifico un foglio posizionato in maniera parallela alla superficie emettente, ha dato luogo a tre aloni:

- Al centro, un giallo molto leggero tuttavia percettibile ad occhio nudo
- Un'aureola bianca
- Un alone giallo marcato che cala di intensità mano a mano che mi sposto verso l'esterno

Per avere conferma di ciò sono state effettuate ulteriori indagini con l'utilizzo dello spettro radiometro che hanno confermato quanto sopra (*Figura 6.19*); tra la zona intermedia e l'aureola ho un netto calo della radiazione blu a favore di un aumento nella zona del giallo mentre tra la zona intermedia e il centro ho un aumento della radiazione gialla.

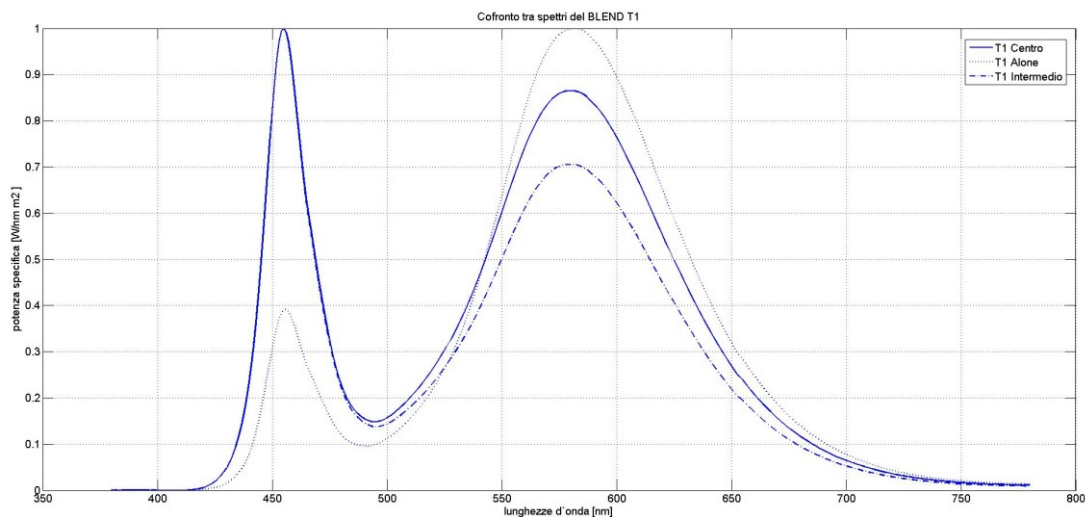


Figura 6.19 Confronto tra spettri di emissione normalizzati

Le temperature di colore relative alle tre zone sono le seguenti:

- Zona centrale 3751K
- Zona intermedia 4108K
- Zona esterna 2938K

6.3.4 Lampada tipo BLEND-T2

Questa lampada è composta da due LED multi giunzione da $5W$ ciascuno ed una potenza radiante valutata di $2,44W$. L'angolo considerato vale $\alpha=0,1\text{ rad}$, con un'intensità massima di $376,9\text{ cd}$ e la distanza alla quale ottengo i 500 lx è $0,920m$.

| Rischio | Simbolo | Esonerato |
|--------------------------------|-----------|----------------|
| UV Attinico | E_S | 0,001 |
| Vicino UV | E_{UVA} | 10 |
| Luce Blu | L_B | 100 |
| Luce Blu piccole sorgenti | E_B | 1 |
| Retina termico | L_R | $28000/\alpha$ |
| Retina termico, stimolo debole | L_{IR} | $6000/\alpha$ |
| Radiazione IR, sull'occhio | E_{IR} | 100 |

| BLEND T2 |
|-----------------------|
| $5,012 \cdot 10^{-9}$ |
| $1,011 \cdot 10^{-4}$ |
| $2,097 \cdot 10^1$ |
| $1,648 \cdot 10^{-1}$ |
| $2,666 \cdot 10^2$ |
| 0 |
| 0 |

| Unità |
|--------------------------------|
| $W \cdot m^{-2}$ |
| $W \cdot m^{-2}$ |
| $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ |
| $W \cdot m^{-2}$ |
| $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ |
| $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ |
| $W \cdot m^{-2}$ |

Tabella 6.7

Anche questa lampada rientra ampiamente nella categoria di rischi degli esonerati.

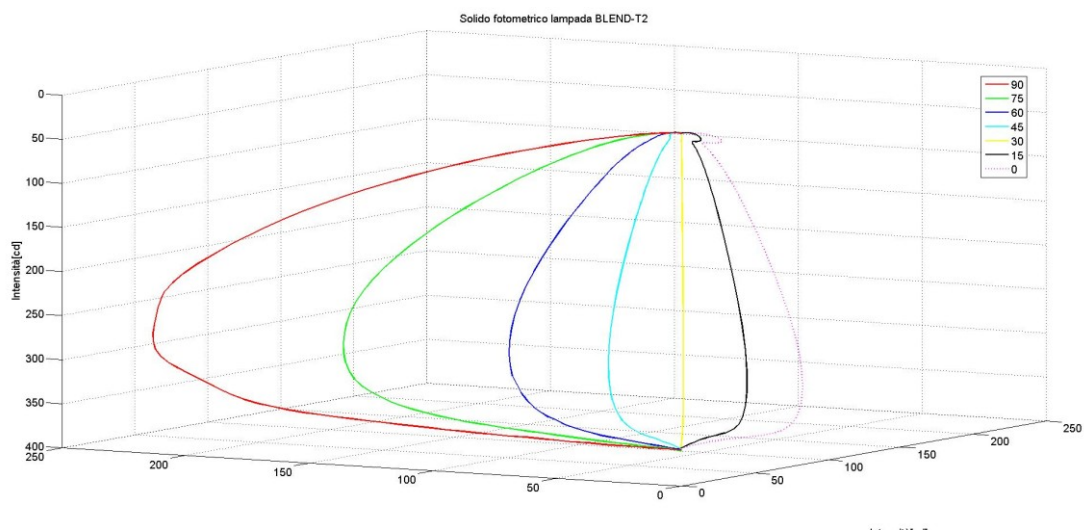


Figura 6.20 Solido fotometrico in coordinate cartesiane

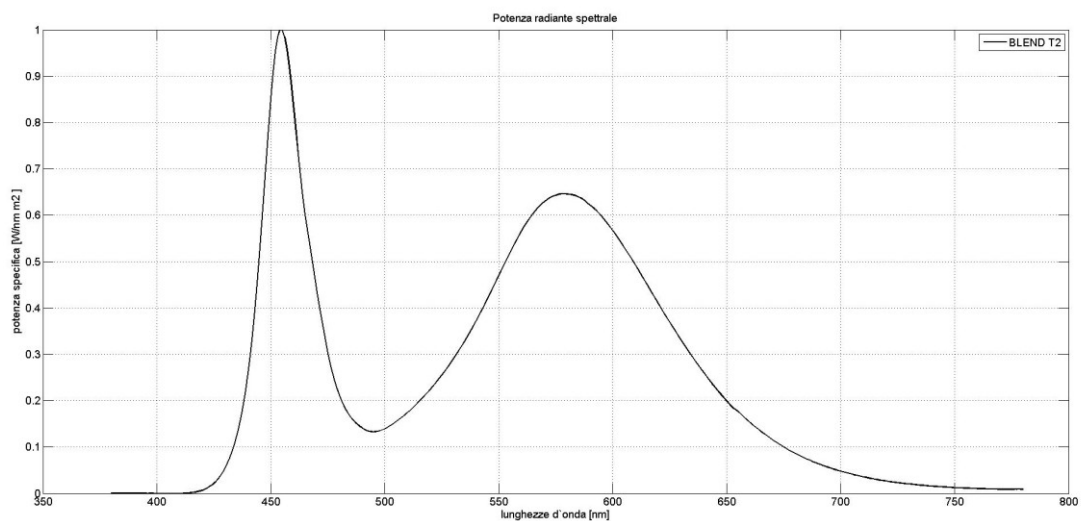


Figura 6.21 Spettro di emissione normalizzato

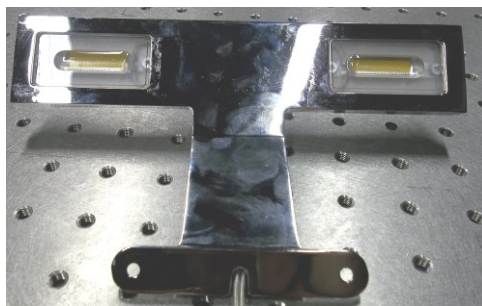


Figura 6.22 Lampada esaminata

Il problema dell'alone visto al paragrafo 6.3.3 è stato riscontrato anche qui in quanto il LED e le ottiche sono le stesse. Anche qui siamo in presenza di tre zone a cromaticità differente come dimostrano le misure spettrali:

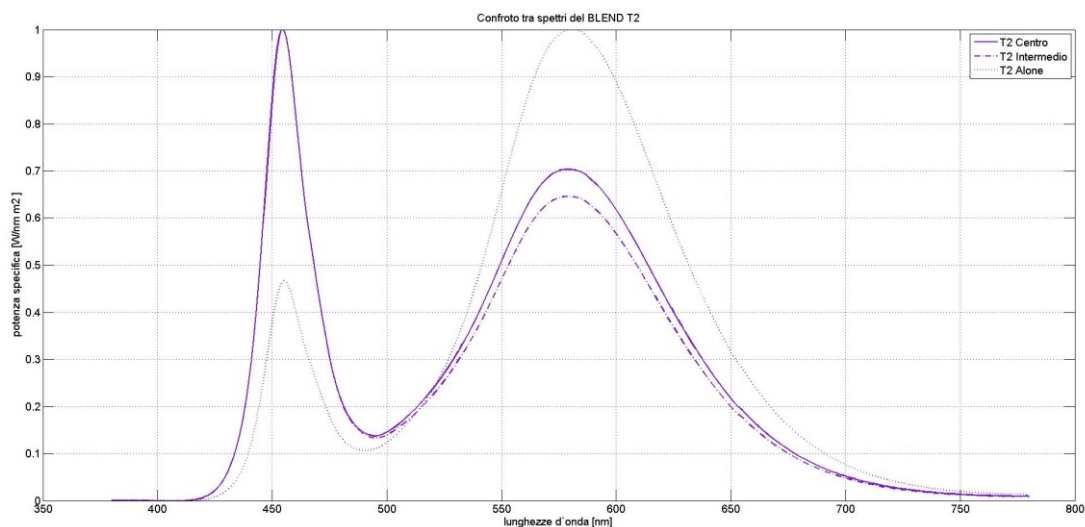


Figura 6.23 Confronto tra spettri di emissione normalizzati

Le temperature di colore relative alle tre zone sono le seguenti:

- Zona centrale 4172K
- Zona intermedia 4364K
- Zona esterna 3047K

La differenza tra alone centrale (linea continua) ed intermedio (linea a tratti) è meno marcata in quanto c'è mescolanza tra i flussi luminosi che mascherano parzialmente il difetto (*Figura 6.24*).



Figura 6.24

6.4 ALTRI TIPI DI ILLUMINANTI

Di seguito sono analizzate altre tipologie di lampada di uso comune. L'analisi è fatta sempre nello spettro del visibile in quanto non è stato possibile effettuare le misure con il monocromatore per la gamma di lunghezze d'onda previste dalla norma visti i tempi stringenti.

6.4.1 Lampade fluorescenti

Le lampade prese in esame sono due fluorescenti da 18W e 36W con dimensioni 1200x30mm. Rispettivamente emettono su una superficie di $4\pi\text{sr}$ i flussi 1300 lm e 2800 lm ed una potenza di 3,62W e 8,08W.

Passiamo ora all'analisi dei dati per la valutazione del rischio dovuto al danno foto biologico:

| Rischio | Simbolo | Esonerato | F18 | F36 | Unità |
|--------------------------------|------------------|----------------|-----------------------|-----------------------|---|
| UV Attinico | E_S | 0,001 | $5,637 \cdot 10^{-9}$ | $4,739 \cdot 10^{-9}$ | $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ |
| Vicino UV | E_{UVA} | 10 | $1,267 \cdot 10^{-4}$ | $1,129 \cdot 10^{-3}$ | $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ |
| Luce Blu | L_B | 100 | $2,602 \cdot 10^{-1}$ | 1,152 | $\frac{\text{W} \cdot \text{m}^{-2}}{\text{sr}^{-1}}$ |
| Luce Blu piccole sorgenti | E_B | 1 | $4,502 \cdot 10^{-3}$ | $1,992 \cdot 10^{-2}$ | $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ |
| Retina termico | L_R | $28000/\alpha$ | 4,778 | $1,551 \cdot 10^1$ | $\frac{\text{W} \cdot \text{m}^{-2}}{\text{sr}^{-1}}$ |
| Retina termico, stimolo debole | L_{IR} | $6000/\alpha$ | / | / | $\frac{\text{W} \cdot \text{m}^{-2}}{\text{sr}^{-1}}$ |
| Radiazione IR, sull'occhio | E_{IR} | 100 | / | / | $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ |

Tabella 6.8

In Figura 6.25 sono mostrati gli spettri delle lampade:

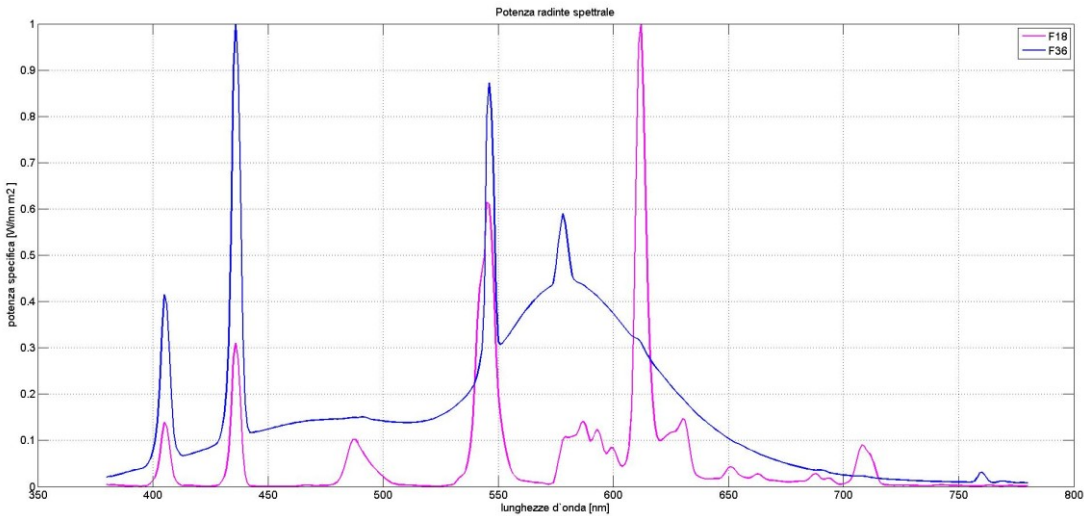


Figura 6.25 Spettri di emissione normalizzati

6.4.2 Lampade a mercurio ad alta pressione

Sono considerate quattro lampade a mercurio da 125W differenti l’una dall’altra solo dai fosfori con dimensione del bulbo di 130x80mm. Anch’esse emettono su una superficie di $4\pi sr$ il flusso di 6300lm con potenze irradiate rispettivamente di 18,13W, 18,01W, 17,95W, 17,93W.

Passiamo ora all’analisi dei dati per la valutazione del rischio dovuto al danno foto biologico:

| Rischio | Simbolo | Esonerato | Basso rischio | Rischio moderato |
|--------------------------------|-----------|----------------|----------------|------------------|
| UV Attinico | E_S | 0,001 | 0,003 | 0,03 |
| Vicino UV | E_{UVA} | 10 | 33 | 100 |
| Luce Blu | L_B | 100 | 10000 | 4000000 |
| Luce Blu piccole sorgenti | E_B | 1 | 1 | 400 |
| Retina termico | L_R | $28000/\alpha$ | $28000/\alpha$ | $71000/\alpha$ |
| Retina termico, stimolo debole | L_{IR} | $6000/\alpha$ | $6000/\alpha$ | $6000/\alpha$ |
| Radiazione IR, sull'occhio | E_{IR} | 100 | 570 | 3200 |

| HG125-18 | HG125-20 | HG125-21 | HG125-23 |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $1,874 \cdot 10^{-6}$ | $1,901 \cdot 10^{-6}$ | $1,975 \cdot 10^{-6}$ | $1,999 \cdot 10^{-6}$ |
| $4,435 \cdot 10^{-2}$ | $4,504 \cdot 10^{-2}$ | $4,653 \cdot 10^{-2}$ | $4,734 \cdot 10^{-2}$ |
| $8,070 \cdot 10^1$ | $8,119 \cdot 10^1$ | $8,158 \cdot 10^1$ | $8,188 \cdot 10^1$ |
| 1,396 | 1,405 | 1,411 | 1,416 |
| $1,094 \cdot 10^3$ | $1,096 \cdot 10^3$ | $1,097 \cdot 10^3$ | $1,099 \cdot 10^3$ |
| / | / | / | / |
| / | / | / | / |

| Unità |
|--------------------------|
| $W \cdot m^{-2}$ |
| $W \cdot m^{-2}$ |
| $W \cdot m^{-2} sr^{-1}$ |
| $W \cdot m^{-2}$ |
| $W \cdot m^{-2} sr^{-1}$ |
| $W \cdot m^{-2} sr^{-1}$ |
| $W \cdot m^{-2}$ |

Tabella 6.9

In Figura 6.26 sono mostrati gli spettri delle lampade:

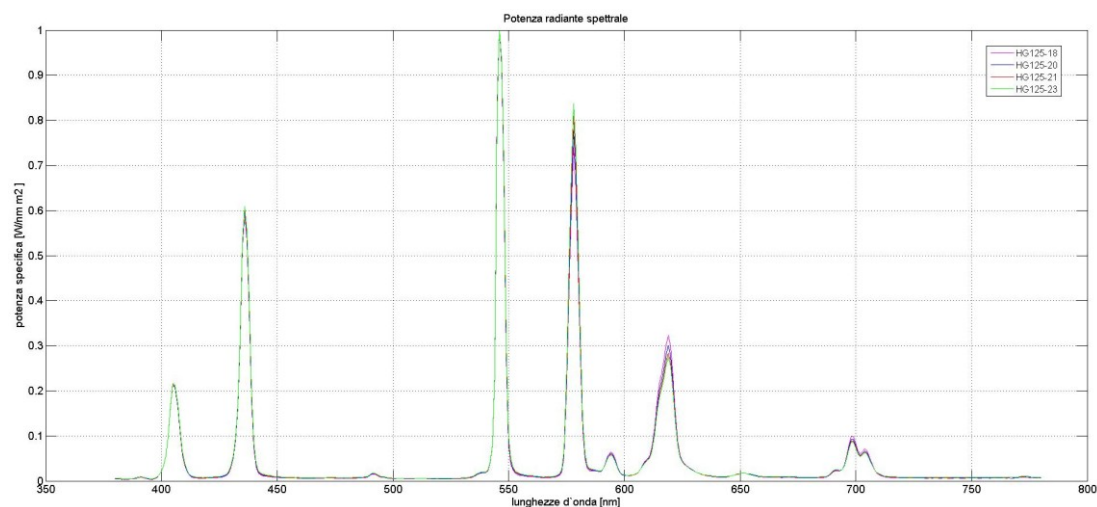


Figura 6.26 Spettri di emissione normalizzati

Possiamo notare che questi modelli di lampade hanno spettro praticamente uguale a meno di piccole differenze attorno ai 570 nm e 630 nm circa.

Queste lampade rientrano nella categoria di rischio moderato in quanto il parametro E_B è inferiore al valore massimo ammissibile per questa categoria ma comunque superiore rispetto alla categoria precedente.

6.4.3 Lampade ad alogeni

Di seguito sono state analizzate due lampade alogene da 200W con un flusso totale emesso di 2000lm e potenze irradiate di 12,20W e 12,79W ed un bulbo sferico di 6mm.

Passiamo ora all'analisi dei dati per la valutazione del rischio dovuto al danno foto biologico:

| Rischio | Simbolo | Esonerato | Basso rischio | Rischio moderato | HL200 | HL200NV | Unità |
|--------------------------------|-----------|----------------|----------------|------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|
| UV Attinico | E_S | 0,001 | 0,003 | 0,03 | $1,093 \cdot 10^{-4}$ | $1,160 \cdot 10^{-4}$ | $W \cdot m^{-2}$ |
| Vicino UV | E_{UVA} | 10 | 33 | 100 | 2,526 | 2,668 | $W \cdot m^{-2}$ |
| Luce Blu | L_B | 100 | 10000 | 4000000 | $1,597 \cdot 10^3$ | $1,604 \cdot 10^3$ | $W \cdot m^{-2} sr^{-1}$ |
| Luce Blu piccole sorgenti | E_B | 1 | 1 | 400 | $2,763 \cdot 10^1$ | $2,774 \cdot 10^1$ | $W \cdot m^{-2}$ |
| Retina termico | L_R | $28000/\alpha$ | $28000/\alpha$ | $71000/\alpha$ | $4,430 \cdot 10^4$ | $4,579 \cdot 10^4$ | $W \cdot m^{-2} sr^{-1}$ |
| Retina termico, stimolo debole | L_{IR} | $6000/\alpha$ | $6000/\alpha$ | $6000/\alpha$ | / | / | $W \cdot m^{-2} sr^{-1}$ |
| Radiazione IR, sull'occhio | E_{IR} | 100 | 570 | 3200 | / | / | $W \cdot m^{-2}$ |

Tabella 6.10

In *Figura 6.27* sono mostrati gli spettri delle lampade:

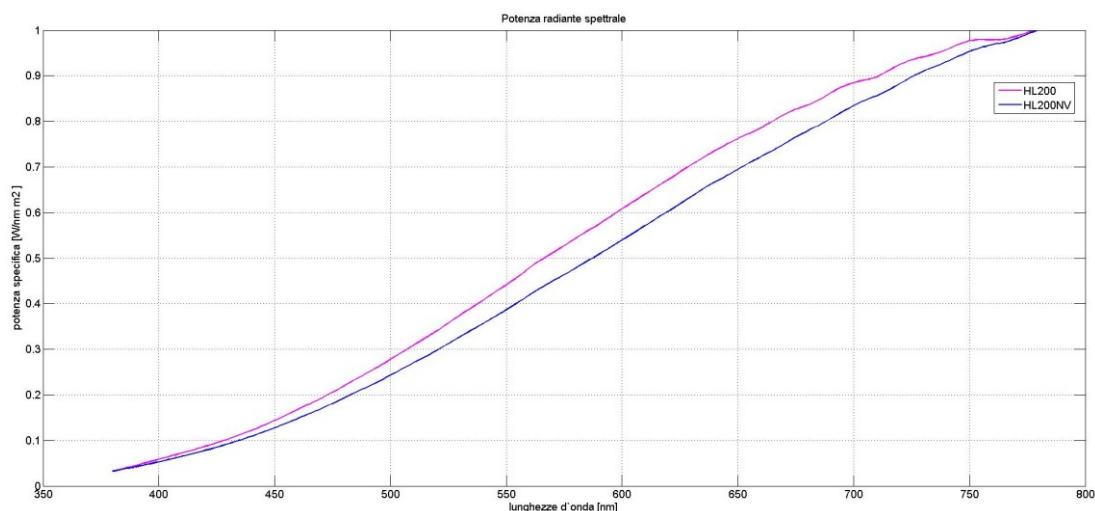


Figura 6.27 Spettri di emissione normalizzati

L'angolo di visuale è stato assunto pari a $\alpha_{\text{eff}}=0,011$ radianti, viste le piccole dimensioni della lampada. Anche in questo caso analizzando il valore E_B notiamo che questo valore è tale da porre queste lampade nella categoria di rischio moderato. Presumibilmente anche i valori di L_{IR} ed E_{IR} , visto il trend di crescita dello spettro (*Figura 6.27*), saranno elevati a tal punto da convalidare la classificazione.

6.4.4 Lampade ad alogenuri

Di seguito sono state analizzate quattro lampade ad alogenuri da 70W con dimensioni identiche a quelle a mercurio, con un flusso totale emesso di 6700lm e potenze irradiate di 24,10W, 24,35W, 22,94W e 23,38W.

Passiamo ora all'analisi dei dati per la valutazione del rischio dovuto al danno foto biologico:

| Rischio | Simbolo | Esonerato | Basso rischio | Rischio moderato |
|--------------------------------|------------------|----------------|----------------|------------------|
| UV Attinico | E_s | 0,001 | 0,003 | 0,03 |
| Vicino UV | E_{UVA} | 10 | 33 | 100 |
| Luce Blu | L_B | 100 | 10000 | 4000000 |
| Luce Blu piccole sorgenti | E_B | 1 | 1 | 400 |
| Retina termico | L_R | $28000/\alpha$ | $28000/\alpha$ | $71000/\alpha$ |
| Retina termico, stimolo debole | L_{IR} | $6000/\alpha$ | $6000/\alpha$ | $6000/\alpha$ |
| Radiazione IR, sull'occhio | E_{IR} | 100 | 570 | 3200 |

| HQI70NDL | HQI70NDNV | HQI70WDL | HQI70WDLNV | Unità |
|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|---|
| $1,528 \cdot 10^{-5}$ | $1,444 \cdot 10^{-5}$ | $5,950 \cdot 10^{-6}$ | $5,167 \cdot 10^{-6}$ | $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ |
| $3,514 \cdot 10^{-1}$ | $3,319 \cdot 10^{-1}$ | $1,296 \cdot 10^{-1}$ | $1,119 \cdot 10^{-1}$ | $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ |
| $1,048 \cdot 10^2$ | $1,019 \cdot 10^2$ | $6,148 \cdot 10^{-1}$ | $5,399 \cdot 10^{-1}$ | $\frac{\text{W} \cdot \text{m}^{-2}}{\text{sr}^{-1}}$ |
| 1,813 | 1,764 | 1,064 | $9,340 \cdot 10^{-1}$ | $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ |
| $1,389 \cdot 10^3$ | $1,370 \cdot 10^3$ | $1,002 \cdot 10^3$ | $9,469 \cdot 10^2$ | $\frac{\text{W} \cdot \text{m}^{-2}}{\text{sr}^{-1}}$ |
| / | / | / | / | $\frac{\text{W} \cdot \text{m}^{-2}}{\text{sr}^{-1}}$ |
| / | / | / | / | $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ |

Tabella 6.11

In *Figura 6.28* sono mostrati gli spettri delle lampade:

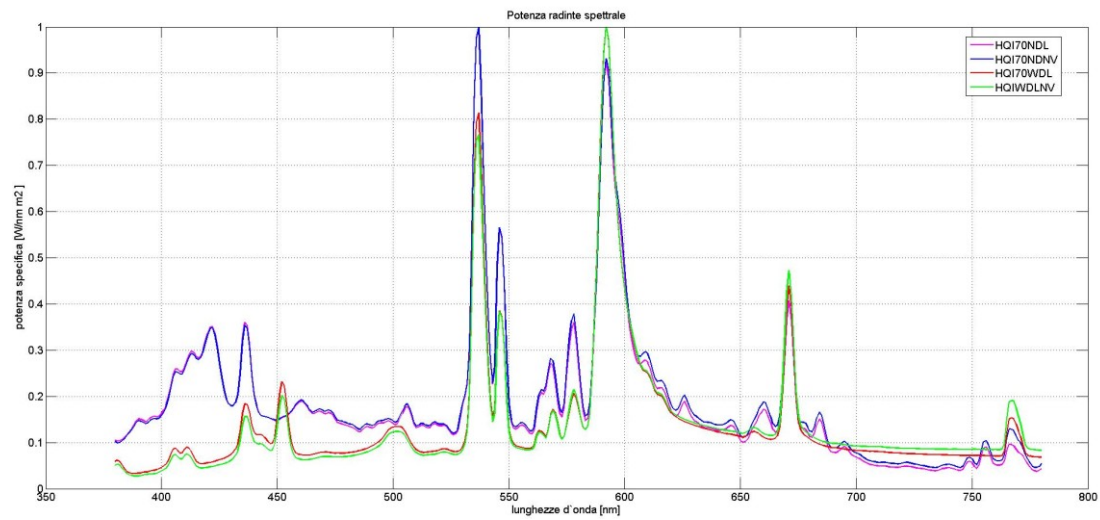


Figura 6.28 Spettri di emissione normalizzati

6.4.5 Lampada ad incandescenza

| Rischio | Simbolo | Esonerato | Basso rischio | Rischio moderato |
|--------------------------------|------------------|-----------|---------------|------------------|
| UV Attinico | E _S | 0,001 | 0,003 | 0,03 |
| Vicino UV | E _{UVA} | 10 | 33 | 100 |
| Luce Blu | L _B | 100 | 10000 | 4000000 |
| Luce Blu piccole sorgenti | E _B | 1 | 1 | 400 |
| Retina termico | L _R | 28000/α | 28000/α | 71000/α |
| Retina termico, stimolo debole | L _{IR} | 6000/α | 6000/α | 6000/α |
| Radiazione IR, sull'occhio | E _{IR} | 100 | 570 | 3200 |

Tabella 6.12

| Incandescenza |
|------------------------|
| 2,315·10 ⁻⁶ |
| 5,496·10 ⁻² |
| 4,197·10 ¹ |
| 7,260·10 ⁻¹ |
| 1,174·10 ³ |
| / |
| / |

| Unità |
|------------------------------------|
| W·m ⁻² |
| W·m ⁻² |
| W·m ⁻² sr ⁻¹ |
| W·m ⁻² |
| W·m ⁻² sr ⁻¹ |
| W·m ⁻² sr ⁻¹ |
| W·m ⁻² |

In *Figura 6.29* sono mostrati gli spettri delle lampade:

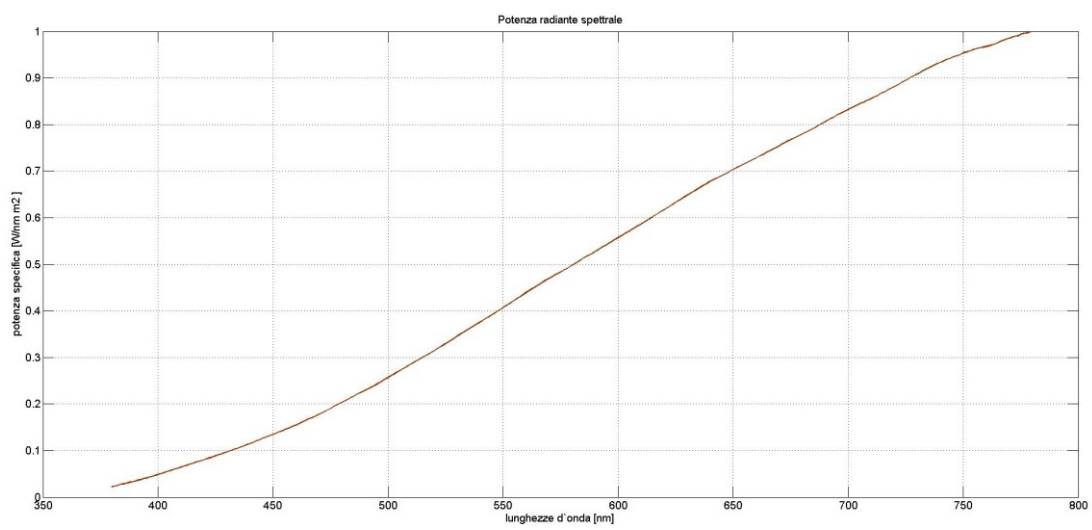


Figura 6.29 Spettro di emissione normalizzato

7 CONCLUSIONI

Le prove effettuate sulle lampade a LED fornite dagli esterni per la valutazione del rischio foto biologico hanno classificato tutti gli illuminati e sistemi di illuminazione nella categoria di rischio degli esonerati. Tale conclusione è plausibile data la natura della tecnologia a semiconduttore ma non del tutto scontata visto che configurazioni differenti potrebbero portare a risultati molto diversi.

La caratterizzazione non deve essere effettuata sul solo corpo illuminante in quanto tutti gli oggetti interposti tra emettitore ed occhio umano concorrono alla modifica sia della geometria che dell'emissione della lampada stessa. Questo fatto è ben visibile nella *Figura 6.21* dove il solo LED di potenza emette una luce a cromaticità costante al variare dell'angolo di visuale, mentre una volta fissata la lente, una biconvessa, veniva accentuata l'emissione gialla ai bordi. Questo problema è probabilmente dovuto ad una scarsa uniformità di fosfori sul led che viene accentuata dalla lente (problemi simili sono stati riscontrati con altri LED in laboratorio ma non sottoposti alla valutazione del rischio) che a sua volta potrebbe celare il problema dell'aberrazione cromatica.

Per quanto riguarda le altre lampade esaminate i valori ottenuti, pur non essendo completi in quanto manca la valutazione della radiazione infrarossa e della radiazione ultravioletta, possono fornire dei dati tali da effettuare una prima classificazione delle stesse. Infatti secondo questa prima analisi le lampade verrebbero così suddivise:

- Fluorescenti, gruppo delle esonerate
- Lampade a mercurio ad alta pressione, Gruppo di Rischio 2
- Lampade ad alogeni, Gruppo di Rischio 2
- Lampade ad alogenuri, Gruppo di Rischio 2
- Lampada ad incandescenza, gruppo delle esonerate

I valori forniti in tabella, come detto in precedenza, non sono completi in quanto mancano le valutazioni di L_{IR} (radianza per il rischio termico debole) e E_{IR} (irradianza per il rischio da radiazione infrarossa) che non sono state effettuate per mancanza fisica delle lampade. Non si è potuto neanche fare delle considerazioni sommarie visto che non è conosciuto lo spettro al di fuori della finestra del visibile e che delle ipotetiche emissioni sarebbero state troppo azzardate (soprattutto per lampade ad alogenuri e mercurio).

In futuro sarà bene concludere quanto iniziato qui sopra predisponendo misure con il monocromatore accoppiato al fotorivelatore per la valutazione spettrale dai 200 nm ai 1400 nm adottando misure di correzione dovute alla calibrazione degli strumenti, alla risposta spettrale del rivelatore e a problemi relativi agli ordini superiori di spettro che comprometterebbero irrimediabilmente i valori ottenuti.

La conclusione di questo metodo dovrebbe portare ad una semplificazione del metodo proposto dalla norma con conseguente risparmio di denaro e tempo. Un siffatto iter sarà applicabile dunque a tutti gli illuminanti in commercio e non alle sole sorgenti a LED rendendolo universale.

ALLEGATO 4

| Lunghezza d'onda [nm] | Funzione peso $S_{UV}(\lambda)$ |
|-----------------------|---------------------------------|
| 200 | 0,03000000 |
| 205 | 0,05100000 |
| 210 | 0,07500000 |
| 215 | 0,09500000 |
| 220 | 0,12000000 |
| 225 | 0,15000000 |
| 230 | 0,19000000 |
| 235 | 0,24000000 |
| 240 | 0,30000000 |
| 245 | 0,36000000 |
| 250 | 0,43000000 |
| 254 | 0,50000000 |
| 255 | 0,52000000 |
| 260 | 0,65000000 |
| 265 | 0,81000000 |
| 270 | 1,00000000 |
| 275 | 0,96000000 |
| 280 | 0,88000000 |
| 285 | 0,77000000 |
| 290 | 0,64000000 |
| 295 | 0,54000000 |
| 297 | 0,46000000 |
| 300 | 0,30000000 |
| 303 | 0,12000000 |
| 305 | 0,06000000 |
| 308 | 0,02600000 |
| 310 | 0,01500000 |
| 313 | 0,00600000 |
| 315 | 0,00300000 |
| 316 | 0,00240000 |
| 317 | 0,00200000 |
| 318 | 0,00160000 |
| 319 | 0,00120000 |
| 320 | 0,00100000 |
| 322 | 0,00067000 |
| 323 | 0,00054000 |
| 325 | 0,00050000 |
| 328 | 0,00044000 |
| 330 | 0,00041000 |
| 333 | 0,00037000 |
| 335 | 0,00034000 |
| 340 | 0,00028000 |
| 345 | 0,00024000 |
| 350 | 0,00020000 |
| 355 | 0,00016000 |
| 360 | 0,00013000 |
| 365 | 0,00011000 |
| 370 | 0,00009300 |

| Lunghezza d'onda [nm] | Funzione peso $S_{UV}(\lambda)$ |
|-----------------------|---------------------------------|
| 375 | 0,00007700 |
| 380 | 0,00006400 |
| 385 | 0,00005300 |
| 390 | 0,00004400 |
| 395 | 0,00003600 |
| 400 | 0,00003000 |

ALLEGATO B

| Lunghezza d'onda [nm] | Funzione peso B(λ) |
|-----------------------|------------------------------|
| 300 | 0,01 |
| 305 | 0,01 |
| 310 | 0,01 |
| 315 | 0,01 |
| 320 | 0,01 |
| 325 | 0,01 |
| 330 | 0,01 |
| 335 | 0,01 |
| 340 | 0,01 |
| 345 | 0,01 |
| 350 | 0,01 |
| 355 | 0,01 |
| 360 | 0,01 |
| 365 | 0,01 |
| 370 | 0,01 |
| 375 | 0,01 |
| 380 | 0,01 |
| 385 | 0,01 |
| 390 | 0,03 |
| 395 | 0,05 |
| 400 | 0,10 |
| 405 | 0,20 |
| 410 | 0,40 |
| 415 | 0,80 |
| 420 | 0,90 |
| 425 | 0,95 |
| 430 | 0,98 |
| 435 | 1,00 |
| 440 | 1,00 |
| 445 | 0,97 |
| 450 | 0,94 |
| 455 | 0,90 |
| 460 | 0,80 |
| 465 | 0,70 |
| 470 | 0,62 |
| 475 | 0,55 |
| 480 | 0,45 |
| 485 | 0,40 |
| 490 | 0,22 |
| 495 | 0,16 |
| 500-600 | $10^{[(450-\lambda)/50]}$ |
| 600-700 | 0,001 |

ALLEGATO C

| Lunghezza d'onda [nm] | Funzione peso R(λ) |
|-----------------------|-------------------------------------|
| 380 | 0,10 |
| 385 | 0,13 |
| 390 | 0,25 |
| 395 | 0,50 |
| 400 | 1,00 |
| 405 | 2,00 |
| 410 | 4,00 |
| 415 | 8,00 |
| 420 | 9,00 |
| 425 | 9,50 |
| 430 | 9,80 |
| 435 | 10,00 |
| 440 | 10,00 |
| 445 | 9,70 |
| 450 | 9,40 |
| 455 | 9,00 |
| 460 | 8,00 |
| 465 | 7,00 |
| 470 | 6,20 |
| 475 | 5,50 |
| 480 | 4,50 |
| 485 | 4,00 |
| 490 | 2,20 |
| 495 | 1,60 |
| 500-600 | 1,00 |
| 600-700 | 1,00 |
| 700-1050 | $10^{[(700-\lambda)/500]}$ |
| 1050-1150 | 0,2 |
| 1150-1200 | $0,2 \cdot 10^{0,02(1150-\lambda)}$ |
| 120-1400 | 0,02 |

ALLEGATO D

```

clc
clear all
close all

%Acquisizione della radianza spettrale

fluxmis=1965;
[XSP,nome]=leggispettroradiometro('K:\Illuminotecnica_e_fotometria\DannoFotobiologico\AAA\dati\Mi
sure\LEDTUBE0.LMT');
[righe,colonne] = size(XSP);
lamb=[380:1:780];
a=leggi_col_match_func('K:\Illuminotecnica_e_fotometria\DannoFotobiologico\AAA\dati\ColourMatchin
gFunction\Col_mat_fun_y');
val=683.*a(2,21:421);                                     %curva fotopica

% scelta dell'illuminante
lamp=8;
pot=XSP(lamp,:);

%correzione dovuta all'errore del cs1000
err=load('K:\Illuminotecnica_e_fotometria\DannoFotobiologico\AAA\file_m\correzione_errore.dat');

pot=pot./err;
flux=val.*pot;                                           % pesatura della potenza con la curva fotopica
figure(1)
subplot(3,1,1)
plot(lamb,val)
title('Curva fotopica')
xlabel('lunghezze d'onda[nm]')
grid on
subplot(3,1,2)
plot(lamb,pot)
title('Spettro di emissione')
xlabel('lunghezze d'onda [nm]')
grid on
subplot(3,1,3)
plot(lamb,flux)
title('Spettro pesato')
xlabel('lunghezze d'onda [nm]')
grid on

%calcolo dell'integrale della potenza spettrale
[fluxnorm,lambt,fluxt,cfun]=integrazione(lamb,flux);
str=sprintf('\n Il flusso normale vale= %5.2f \t lumen', fluxnorm);
disp(str)

%calcolo del fattore correttivo del flusso
kfl=fluxmis/fluxnorm;
str2=sprintf('\n Il fattore correttivo del flusso vale Kfl= %5.2f \t ', kfl);
disp(str2)
kfl2=600/fluxnorm;
potsp=kfl.*pot;                                           %vettore potenza radiante spettrale

%grafici
figure('Name','Potenza specifica')
plot(lamb,potsp)
xlabel('lunghezze d'onda [nm]')
ylabel('potenza specifica [W/nm m2 ]')
title('Potenza radiante spettrale')
grid on

Iol2=(pot.*kfl2);
radiance=Iol2./(0.00985*10.71*cos(pi/2-1.5));
radiance=radiance';

rad(:,1)=lamb;
rad(:,2)=radiance;
[potenza,lambt,fluxt,cfun]=integrazione(rad(:,1)',potsp);
str7=sprintf('\n La potenza irradiata e' %5.2f W \t ', potenza);
disp(str7)

%curva peso per Vicino-ultravioletto
Snuv=letturapeso('K:\Illuminotecnica_e_fotometria\DannoFotobiologico\AAA\dati\Weighting_function.
xls', 'Near-UV');
xdata=intersect(rad(:,1), Snuv(:,1));
b=size(xdata);
ydata=zeros(1,b(1,1));
for i=1:b(1,1)
    ydata(i)=rad(i,2).*Snuv(i,2);
end
[radwNUL,lambt,fluxt,cfun]=integrazione(xdata',ydata);

```

```

% curva peso ultravioletto, lettura e interpolazione logaritmica
Suv=letturapeso('K:\Illuminotecnica_e_fotometria\DannoFotobiologico\AAA\dati\Weighting_function.xls', 'Ultravioletto');
[Suvcorr]=loginterp(Suv);
xdata=intersect(rad(:,1), Suvcorr(:,1));
b=size(xdata);
for i=1:b(1,1)
    ydata(i)=rad(i,2).*Suvcorr(i,2);
end
format short e;
[radwUL, lambt, fluxt, cfun]=integrazione(xdata', ydata);

% curva peso infrarosso, lettura e interpolazione logaritmica
Rl=letturapeso('K:\Illuminotecnica_e_fotometria\DannoFotobiologico\AAA\dati\Weighting_function.xls', 'Infrarosso');
[Rlcorr]=loginterp(Rl);

xdata=intersect(rad(:,1), Rlcorr(:,1));
b=size(xdata);
for i=1:b(1,1)
    ydata(i)=rad(i,2).*Rlcorr(i,2);
end
format short e;
[radwIR, lambt, fluxt, cfun]=integrazione(xdata', ydata);
radwIR;

% curva peso bluelight, lettura e interpolazione logaritmica
Bl=letturapeso('K:\Illuminotecnica_e_fotometria\DannoFotobiologico\AAA\dati\Weighting_function.xls', 'Bluelight');
[Blcorr]=loginterp(Bl);

xdata=intersect(rad(:,1), Blcorr(:,1));
b=size(xdata);
for i=1:b(1,1)
    ydata(i)=rad(i,2).*Blcorr(i,2);
end
format short e;
[radwBL, lambt, fluxt, cfun]=integrazione(xdata', ydata);
radwBL;
kl=0.0173;

irradwNUL=radwNUL*kl;
irradwUL=radwUL*kl;
irradwIR=radwIR*kl;
irradwBL=radwBL*kl;

str3=sprintf('\n Radianza vicino-ultravioletto Luva : \t\t %5.3e W/m2*sr ', radwNUL);
disp(str3)
str4=sprintf('\n Radianza ultravioletta Luv: \t \t %5.3e W/m2*sr ', radwUL);
disp(str4)
str5=sprintf('\n Radianza infrarossa Lr: \t \t \t %5.3e W/m2*sr ', radwIR);
disp(str5)
str6=sprintf('\n Radianza luce blu Lb: \t \t \t %5.3e W/m2*sr ', radwBL);
disp(str6)

str8=sprintf('\n Irradianza vicino-ultravioletto Euva: %5.3e W/m2*sr\n ', irradwNUL);
disp(str8)
str9=sprintf('\n Irradianza ultravioletta Es: \t \t %5.3e W/m2*sr\n ', irradwUL);
disp(str9)
str10=sprintf('\n Irradianza infrarossa Er: \t \t \t %5.3e W/m2*sr\n ', irradwIR);
disp(str10)
str11=sprintf('\n Irradianza luce blu Eb: \t \t \t %5.3e W/m2*sr\n ', irradwBL);
disp(str11)

figure('Name','Funzioni peso')
subplot(3,1,1)
semilogy(lamb(:,1:21), Suvcorr(:,2))
title('Peso Ultravioletto')
xlabel('lunghezze d`onda[nm]')
grid on
subplot(3,1,2)
semilogy(lamb, Rlcorr(:,2), 'm')
title('Peso Infrarosso')
xlabel('lunghezze d`onda[nm]')
grid on
subplot(3,1,3)
semilogy(lamb(1:321), Blcorr(1:321,2), 'r')
title('Peso Bluelight')
xlabel('lunghezze d`onda[nm]')
grid on

fid=fopen('K:\Illuminotecnica_e_fotometria\DannoFotobiologico\AAA\dati\risultati.rtf','w');

```

```

fprintf(fid,'\n Potenza irradiata: \t %5.2f W', potenza);
fprintf(fid,'\n Radianza vicino-ultravioletto Luva : %5.3e W/m2*sr\n ', radwNUL);
fprintf(fid,'\n Radianza ultravioletto Luv: \t \t %5.3e W/m2*sr \n ', radwUL);
fprintf(fid,'\n Radianza infrarossa Lr: \t \t \t %5.3e W/m2*sr \n ', radwIR);
fprintf(fid,'\n Radianza luce blu Lb: \t \t \t %5.3e W/m2*sr \n ', radwBL);
fprintf(fid,'\n Irradianza vicino-ultravioletto Euva: %5.3e W/m2*sr\n ', irradowNUL);
fprintf(fid,'\n Irradianza ultravioletto Es: \t \t %5.3e W/m2*sr\n ', irradowUL);
fprintf(fid,'\n Irradianza infrarossa Er: \t \t \t %5.3e W/m2*sr\n ', irradowIR);
fprintf(fid,'\n Irradianza luce blu Eb: \t \t \t %5.3e W/m2*sr\n ', irradowBL);
fclose(fid);
load intensita
[theta]=intensita(I);

```

Function utilizzate:

```

function [XSP,nome]=leggispettro(radiometro(filemisura));
fid=fopen([filemisura], 'r');

```

```

na=0;
line=fgetl(fid);

```

```

while line~-=-1

```

```

    na=na+1;

```

```

    %RICAVA IL NOME DELLO SPETTRO

```

```

    line=fgetl(fid);
    lungh=size(line);
    lungh=lungh(2);
    if lungh==3
        line_p=line;
        clear line
        line(1)=line_p(2);
        line(2)=' ';
        line(3)=' ';
    end

```

```

    if lungh==4
        line_p=line;
        clear line
        line(1)=line_p(2);
        line(2)=line_p(3);
        line(3)=' ';
    end

```

```

    if lungh==5
        line_p=line;
        clear line
        line(1)=line_p(2);
        line(2)=line_p(3);
        line(3)=line_p(4);
    end

```

```

    if lungh>5
        line_p=line;
        clear line
        line(1)=line_p(2);
        line(2)=line_p(3);
        line(3)=line_p(4);
        line(4)=line_p(5);
        line(5)=line_p(6);
    end

```

```

end

```

```

nome(na,:)=line;
%FINE RICAVA NOME

```

```

line=fgetl(fid);
data(na,:)=line(2:length(line)-1);
line=fgetl(fid);
line=fgetl(fid);
line=fgetl(fid);

```

```

n=1;
while line(n)~=', '
    n=n+1;
end
n=n+2;
n1=n;
while line(n)~=' "'
    n=n+1;
end
n2=n-1;
it(na)=str2double(line(n1:n2));

```

```

        for k=1:6
            line=fgetl(fid);
        end

        XSP(na,:)=fscanf(fid,'%g',[1,401]);
        line=fgetl(fid);
        line=fgetl(fid);
    end

    fclose(fid);

function a=leggi_col_match_func(nomefile)

fid=fopen(nomefile,'r');
for n=1:8
    line=fgetl(fid);
end
Nl=str2double(fgetl(fid));
a=fscanf(fid,'%g %g',[2,inf]);
fclose(fid);

function [theta]=intensita(I)
theta=(90:1:180);
thetac=(90:-1:0);
thetar=theta.*(pi/180);
thetarc=thetac.*(pi/180);
figure('name','Andamento emissione')
polar(thetar,I)
hold on
polar(thetarc,I)
angle = deg2rad(0:1:180);           %confronto con emissione cosinusoidale
b=max(max(I)).*sin(angle);
polar(angle,b,'-r')
legend('reale','','ideale',1)
hold off

function[integrale,xcolvector,ycolvector,cfun]=integrazione(xdata,ydata)
xcolvector=xdata';
ycolvector=ydata';
cfun=fit(xcolvector,ycolvector,'pchipinterp');

fluxnorm=integrate(cfun,xdata,xdata(1));
[m,n]=size(fluxnorm);
integrale=fluxnorm(m);

```

BIBLIOGRAFIA

- [1] CEI-IEC 62471 "*Photobiological safety of lamps and lamp systems*" ref. number
CEI/IEC62471:2006
- [2] L. Fellin, G. Forcolini, P. Palladino, *Manuale di illuminotecnica*, AIDI, Milano, Tecniche Nuove, 1999
- [3] P. Palladino, *Lezioni di illuminotecnica*, Milano, Tecniche Nuove, 2002
- [4] Robert Altkorn, Scott Milkovich, Gene Rider, "*Light emitting diode and safety standards*", IEEE
RAM consulting
- [5] Illuminating Engineering Society of North America, *The IESNA Lighting Handbook*, Mark Stanley
Rea 1993
- [6] M. Bonomo, *Teoria e tecnica dell'illuminazione d'interni*, Rimini, Maggioli Editore, 2003
- [7] G. Forcolini, *Illuminazione LED*, Milano, Hoepli, 2008
- [8] D.Lgs. 9 aprile 2008, n.81, in materia di "*Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro*"